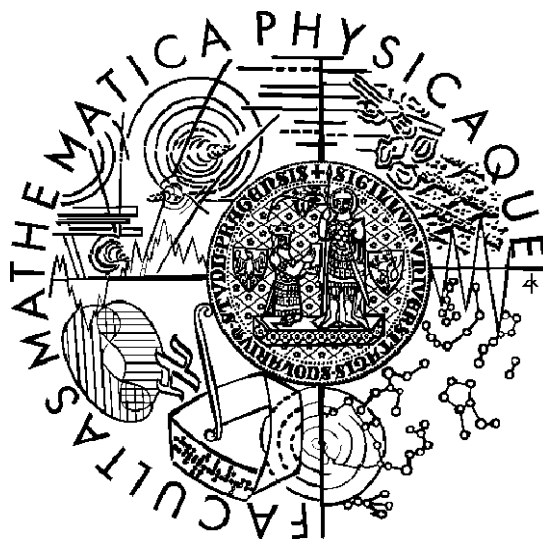


Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta



## Bakalárska práca

Peter Matvija

Studium interakce atomů kovů s metastabilními rekonstrukcemi  
povrchu Si(111) pomocí STM

Katedra fyziky povrchů a plazmatu  
Vedúci práce: RNDr. Pavel Kocán, Ph.D.

Studijní program: Obecná fyzika

Studijní obor: Fyzika povrchů a ionizovaných prostředí

Praha 2011

## **Pod'akovanie**

Predovšetkým sa chcem pod'akovať vedúcemu bakalárskej práce RNDr. Pavlovi Kocánovi, Ph.D. za jeho odborné vedenie, rady a pripomienky pri písaní práce, meraní a spracovávaní dát. Pod'akovanie rovnako patrí aj všetkým členom „Skupiny fyziky tenkých vrstev“ za pomoc pri riešení problémov, ktoré sa počas riešenia práce vyskytli a poskytnutie dobrého pracovného prostredia. V neposlednom rade sa chcem pod'akovať aj všetkým ostatným členom Katedry fyziky povrchov a plazmatu a mojím ostatným doterajším pedagógom na MFF za ich vedenie vo vzdelávaní sa a cenné vedomosti, ktoré som ich prostredníctvom získal.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 13.5.2011

podpis

Název práce: Studium interakce atomů kovů s metastabilními  
rekonstrukcemi povrchu Si(111) pomocí STM

Autor: Peter Matvija

Katedra / Ústav: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Pavel Kocán, Ph.D., Katedra fyziky povrchů a  
plazmatu

Abstrakt: Metódou STM je skúmaný proces rekonštrukcie povrchu Si(111) po naparení tália a jeho následnej desorbcií. Je nameraná závislosť pokrytia povrchu táliom na teplote a z určenej závislosti sú vyvedené vhodné podmienky pre tvorbu povrchu s čo najvyšším zastúpením metastabilných rekonštrukcií (hlavne (5x5) a (9x9)). Na takto vytvorený povrch sú následne naparené rôzne množstvá Al a je pozorovaná možnosť vzniku magických klastrov a iných zaujímavých štruktúr. Sú navrhnuté možné štruktúrne modely pre magické klastre na rekonštrukcii (5x5). V rámci práce je popísaná aparátúra použitá pri meraniach, sú popísané jednotlivé meracie postupy a fyzikálne princípy spojené s prevádzkou STM.

Klíčová slova: STM, 7x7, 5x5, Si(111), rekonštrukcia



Title: Study of metal atoms interactions with metastable reconstructions of Si(111) surface using STM

Author: Peter Matvija

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: RNDr. Pavel Kocán, Ph.D., Department of Surface and Plasma Science

Abstract: Process of reconstruction of Si(111) surface after vapor deposition of thallium and subsequent desorption is studied by STM. Dependency of surface coverage on temperature is determined and this dependency is afterwards used for determination of ideal conditions for creation of surface with the biggest possible part with metastable reconstructions (mostly (5x5) and (9x9)). This surface is then covered by vapor deposition by different amounts of Al and possibility of creation of magic clusters and other interesting structures is investigated. Structural models for magic clusters on (5x5) are proposed. The work includes description of experimental devices used in measurements as well as description of procedures and physical principles connected with functioning of STM.

Keywords: STM, 7x7, 5x5, Si(111), reconstruction

## Obsah:

1. Úvod:	1
2. Teoretická časť:	3
2.1. Všeobecné poznatky o raste tenkých vrstiev:	3
2.2. Objemové vlastnosti Si:	5
2.3. Povrchové vlastnosti Si:	6
2.4. Rekonštrukcie pozorované na Si(111):	6
2.4.1. (1x1)	6
2.4.2. (2x2), c(2x4), c(2x8)	6
2.4.3. $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$	8
2.4.4. (7x7)	8
2.4.5. Magické klastre na Si(111)-7x7:	10
2.4.6. (5x5), (9x9) (všeobecne $(2n+1) \times (2n+1)$ ) a magické klastre na nich	14
3. Popis experimentálnej aparatury STM:	18
3.1. Naparovací systém:	19
3.2. Určenie množstva napareného materiálu:	20
3.3. Meranie teploty podložky:	21
3.4. Vákuový systém STM:	21
3.5. Popis zobrazovacej časti STM:	23
3.6. Čistota použitého materiálu:	25
4. Výsledky merania:	26
4.1. Metodika merania:	26
4.2. Príprava povrchu s metastabilnými rekonštrukciami	28
4.3. Povrch Si(111)- $(2n+1) \times (2n+1)$ – magické klastre	39
4.4. Magické klastre na Si(111)-(5x5) ?	42
4.5. Pokračovanie meraní	48
5. Záver:	49
6. Referencie:	50
7. Použité skratky:	53

## 1. Úvod:

Vo všeobecnosti sa dá povedať, že dvojrozmerné usporiadania objektov (na povrchoch, rozhraniach a pod.) vykazujú odlišné fyzikálne vlastnosti oproti objemovo rozloženým 3D objektom. Štúdiu 2D objektov sa preto dlhodobo venuje veľká pozornosť, ktorá aj v súčasnosti prináša významné vedecké výsledky (grafen, fullereny, povrchové katalyzátory, samoorganizované povrchové štruktúry atď.).

Medzi jednu z najštudovanejších povrchových štruktúr vôbec doposiaľ patrila rekonštrukcia Si(111)-(7x7). Vysoká stabilita rekonštrukcie a to že sa jedná o kremík, ktorý je používaný ako základný stavebný prvok väčšiny integrovaných obvodov je dôvodom veľkého záujmu o tento povrch. Cieľom je samozrejme ďalšia miniaturizácia doposiaľ používaných elektronických súčiastok, ale aj ďalšie možné aplikácie plynúce z vlastností novovytvorených druhov povrchových usporiadaní.

V tomto ohľade sa ako možná alternatíva výskumu rekonštrukcie Si-(7x7) javí výskum rekonštrukcie Si-(5x5). Jedná sa o rekonštrukciu z rovnakej triedy  $(2n+1) \times (2n+1)$  rekonštrukcií charakteristických ďalekodosahovým usporiadaním dimérových podpovrchových línií. Spomenuté línie sú vzhľadom k sebe pootočené o  $60^\circ$  a tvoria dobre definovanú povrchovú sieť vhodnú na použitie pre definovaný rast periodických povrchových štruktúr.

Hlavným obsahom práce je preskúmanie správania sa metastabilných rekonštrukcií triedy DAS (dimer-atom-stacking), predovšetkým (5x5), vo vzťahu k napareným atómom, o ktorých je známe, že sú na povrchu schopné vytvárať magické klastre. Pozorovaním správania sa atómov skupiny III.B na čiastočne zrekonštruovanom povrchu obsahujúcom oblasti (7x7), (5x5) a (9x9) sa zisťujú možnosti vytvárania periodicky usporiadaných magických klastrov s danou periodicitou rekonštrukcie. Sú navrhnuté možné štruktúrne modely Al klastrov na rekonštrukcii (5x5) a dané modely sú konfrontované s experimentom.

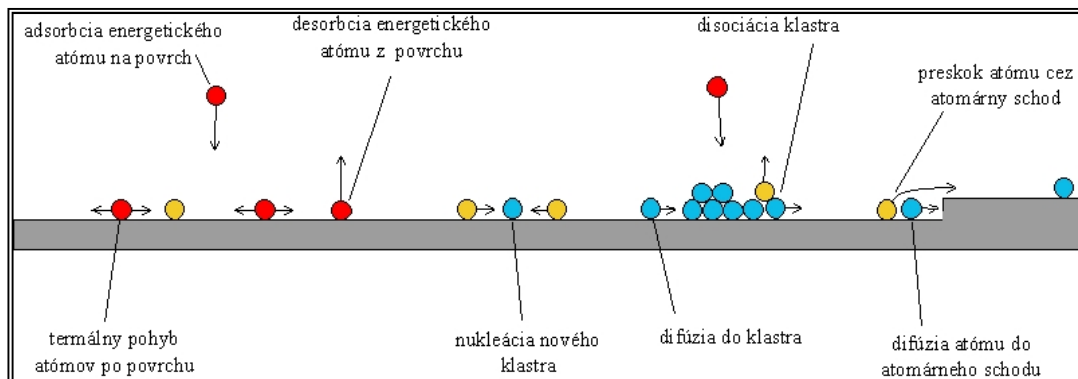
Veľkou časťou práce je aj hľadanie vhodnej metódy prípravy povrchu s metastabilnými rekonštrukciami, kde by sa okrem stabilnej (7x7) vyskytovali vo väčšej miere aj (5x5), (9x9) a iné. K tomuto účelu je podrobne preskúmaný proces desorpcie tália z povrchu Si(111)-(7x7), je určená jeho desorbčná krivka a z toho stanovené

ideálne podmienky na vznik povrchu s maximálnym pokrytím metastabilnými rekonštrukciami.

## 2. Teoretická časť:

V tejto časti budeme využívať informácie uvedené v [4,5,6]. V prípade použitia špecifickej informácie z iného zdroja sú odkazy uvedené priamo v texte.

### 2.1. Všeobecné poznatky o raste tenkých vrstiev:



Obrázok 2.1: Procesy prebiehajúce na povrchu (červené častice sú energetické častice práve naparené materiálu (vysoká energia znamená vysoká frekvencia preskokov medzi jednotlivými potenciálovými jamami, resp. vysoká pravdepodobnosť desorpcie z povrchu), žlté častice sú menej energetické častice, ktoré stratili časť svojej energie preskokmi cez potenciálové bariéry na povrchu, modré častice sú nízko energetické častice, ktoré na povrchu strávili už relatívne dlhú dobu (nízka energia znamená relatívnu stabilitu v potenciálovej jame, v ktorej sa práve častica nachádza a malú pravdepodobnosť desorpcie)).

Procesmi zobrazenými na obrázku 2.1 sa zaoberajú rôzne odvetvia výskumu [1]. Všeobecne však všetky procesy prebiehajúce na povrchu závisia na mnohých vnútorných a vonkajších parametroch, preto sa dnes skúmanie zameriava na konkrétne vlastnosti rôznych povrchových štruktúr a na procesy vedúce k ich tvorbe (adsorpcia, desorpcia, povrchová a objemová difúzia [2,3] atď.).

Na povrch dopadajú častice zväčša s kinetickou energiou, ktorá je vyššia ako priemerná energia častíc na povrchu (energia častíc dopadajúcich častíc, v prípade, že v priestore nie je žiaden iný energetický zdroj je daná teplotou vyparovadla, ktorá musí

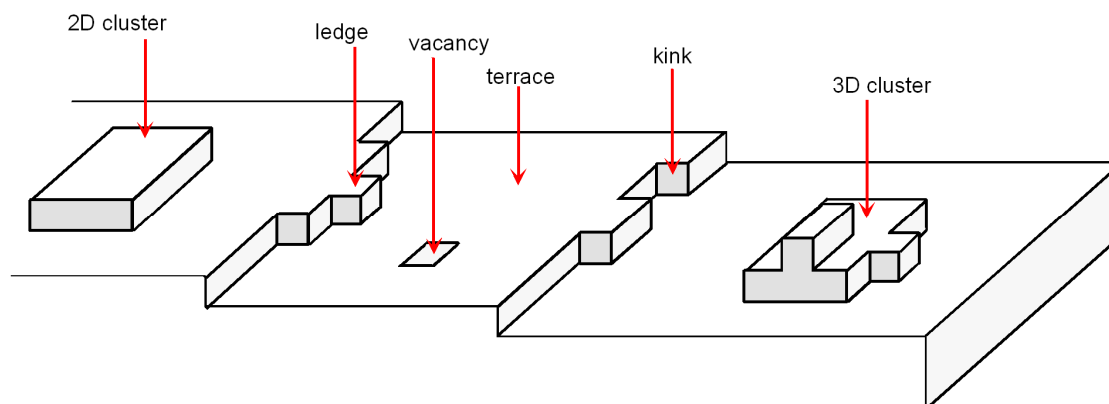
byť dostatočná na to, aby sa z neho atómy v dostatočnej miere odparovali). Prebytočnú energiu strácajú zrážkami s ostatnými povrchovými časticami a preskokmi medzi jednotlivými potenciálovými bariérami na povrchu.

Z celkového pohľadu na povrchu prebiehajú dve protichodné deje: adsorbcia a desorbcia častíc. Pomer týchto dvoch dejov je daný hlavne teplotou, na ktorú povrch zahrejeme. Teplotná závislosť intenzity desorbcie plynie priamo zo vzťahu pre pravdepodobnosť preskoku atómu cez potenciálovú bariéru daného Boltzman-Maxwellovou štatistikou:

$$p_D = \kappa \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right) \quad (2.1)$$

kde  $p_D$  je početnosť desorbcie,  $\kappa$  je tzv. kinetický prefaktor,  $E_D$  je aktivačná energia desorbcie a  $T$  je termodynamická teplota atómu. Keďže uvedený vzťah vychádza len z úvah o prekonávaní potenciálových bariér, je rovnaký vzťah s uvedením aktivačnej energie daného procesu možné použiť pre všetky termálne aktivované procesy na povrchu (disociácia atómov z klastra, preskoky atómov medzi jednotlivými potenciálovými minimami na povrchu atď.).

Konečný výzor povrchového usporiadania po schladení na však okrem teploty ohrevu závisí aj na rade ďalších vonkajších parametrov (rýchlosť naparovania, množstvo naparenej látky, rýchlosť schladenia vzorky po ohreve, teplota na ktorej sa podložka udržiava počas merania) a vnútorných parametrov (chemické zloženie adsorbátu a substrátu, objemová a povrchová geometria substrátu). Každá definovaná zmena týchto vnútorných a vonkajších parametrov, tak pre vonkajšieho pozorovateľa predstavuje istú informáciu o tom, ako jednotlivé atómy na zmeny podmienok reagujú a ako to ovplyvňuje povrchovú rekonštrukciu ako celok.



Obrázok 2.2: Pomenovanie špecifických polôh na reálnom povrchu pri raste tenkých vrstiev (názvy sú uvedené v angličtine, pretože používanie anglických označení daných polôh je bežne zaužívané)

Okrem kinetickej energie častíc závisí výsledný tvar povrchu aj na interakcii atómov adsorbátu a substrátu a atómov adsorbátu medzi sebou. Všeobecne sa dá povedať, že rozlišujeme atraktívnu a repulzívnu interakciu medzi atómami adsorbátu a vzhľadom k tomu rozlišujeme viac módov rastu tenkých vrstiev. Rast tenkej vrstvy preto nemusí byť homogénny na celom povrchu. Vytvárajú sa 2D, neskôr aj 3D ostrovčeky naparenej látky, atomárne schody a pod. (obr. 2.2).

## 2.2. Objemové vlastnosti Si:

Objemové rozloženie atómov kremíka je význačné tým, že patrí medzi tzv. tesne usporiadané štruktúry, čo znamená že jednotlivé atómy zaujímajú polohu tak, aby celkový objem bol čo najmenší (rovnaké rozloženie s minimálnym objemom by bolo stabilným rozložením gulí umiestnených do priestoru). Z hľadiska kategorizácie podľa bodových prvkov symetrie patrí do skupiny plošne centrovaných kubických sústav (fcc). Čo sa týka viazanosti, tak v objeme má Si všetky štyri dostupné väzby saturované.

### 2.3. Povrchové vlastnosti Si:

Na rozdiel od atómov rozmiestnených v objeme materiálu Si, atómy na povrchu nemajú nasýtené všetky väzby. Keďže snahou všetkých fyzikálnych systémov je dospieť do stavu s čo najnižšou energiou, povrchové atómy sa snažia znížiť celkovú energiu tým, že vytvárajú väzby medzi sebou, prípadne väzby s atómami adsorbátu. Takýmto spôsobom vznikajú rôzne povrchové rekonštrukcie typické tým, že na vytvorenie každej z nich je potrebné povrchovým atómom dodať rôzne množstvo energie (zahriať povrch na rôzne vysokú teplotu). Najstabilnejšie rekonštrukcie vznikajú po zahriatí na najvyššie teploty (a následnom pomalom schladení), pretože atómy v takomto prípade majú najviac energie na prekonanie prípadných potenciálových bariér, ktoré im môžu brániť v umiestnení sa do energeticky najvýhodnejšej pozície. V tejto práci venujeme pozornosť predovšetkým povrchovej rovine Si(111) a tak aj všetky nasledujúce informácie súvisiace s experimentom sa budú týkať výlučne tohto povrchu.

### 2.4. Rekonštrukcie pozorované na Si(111):

#### 2.4.1. (1x1)

Základnou rekonštrukciou vyskytujúcou sa na povrchu Si(111) pri naparení jednoväzbových atómov je (1x1). Všetky voľné povrchové väzby Si sú v tomto prípade saturované práve jedným atómom. Vzhľadom k povrchu súvisle pokrytému (1x1) sa potom určuje pokrytie pri ostatných rekonštrukciách. Zaužívanou jednotkou pokrytia je ML (monolayer, monovrstva), ktorá v prípade Si(111)-(1x1) s povrchovou koncentráciou atómov poslednej vrstvy súvisí podľa vzťahu:

$$1ML = 7,83 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \quad (2.2)$$

Rekonštrukcia (1x1) je spomedzi všetkých pozorovaných najhustejšou, čo spôsobuje aj problémy pri jej zobrazovaní. Rozlišovacia schopnosť STM je v tomto prípade takmer na svojej hranici a dané rozlíšenie dosahuje len výnimočne.

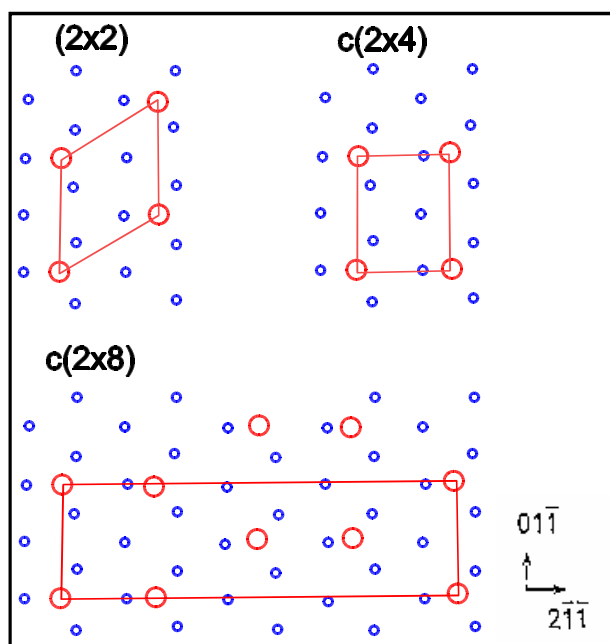
#### 2.4.2. (2x2), c(2x4), c(2x8)

Atómy z povrchovej vrstvy Si sa vo väčšine podmienok dokážu preusporiadať do rekonštrukcie, ktorá je redšia, ale energeticky výhodnejšia. Jednou triedou rekonštrukcií



s rovnakou povrchovou hustotou Si adatómov je trieda, ktorú tvoria rekonštrukcie (2x2), c(2x4), c(2x8).

Vo všetkých troch vidíme ako základ pásy Si adatómov v smere (1,-1,0) (prvý vektor primitívnej bunky Si(1x1)), resp. (0,1,-1), v ktorých sú jednotlivé adatómy od seba vzdialené o dvojnásobok vektoru primitívnej bunky rekonštrukcie (1x1). V prípade rekonštrukcie (2x2) sú Si adatómy v susedných pásoch k sebe posunuté o dvojnásobok druhého vektora primitívnej bunky Si (1x1). V prípade c(2x4) sú susedné adatómy v pásoch umiestnené hneď vedľa seba (v smere (2,-1,-1)), čo znamená, že ak sa budeme z ľubovoľného adatómu pohybovať v smere druhého vektora primitívnej bunky (1x1), tak na ďalší adátom narazíme vo vzdialenosti štyri krát väčšej ako je vzdialenosť Si v (1x1). Posledná rekonštrukcia c(2x8) [7] vzniká striedaním dvoch predchádzajúcich. To znamená, že sa striedajú pásy Si v smere (1,-1,0), v ktorých sú atómy umiestnené vedľa seba a pásy, v ktorých sú atómy posunuté o druhý vektor primitívnej bunky (1x1). Ako je vidieť, tak pomenovania jednotlivých povrchových rekonštrukcií na Si(111) sa odvíjajú od toho akú periodicitu majú jednotlivé rekonštrukcie vzhľadom k posunutiu o vektory základnej povrchovej rekonštrukcie Si(111)-(1x1).

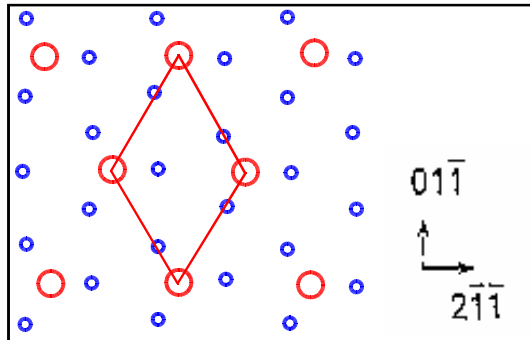


Obr. 2.3: Rozmiestnenie adatómov voči základnej mriežke Si(111)1x1 pri daných rekonštrukciách (modré = Si atómy, červené = Si adatómy, vyznačené sú aj elementárne bunky daných rekonštrukcií)

### 2.4.3. $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$

V tejto rekonštrukcii dochádza k tomu, že v smere (2,-1,-1) sú vedľa seba Si adatómy napojené vždy na trojici povrchových Si. Atómy v susednej línii sú taktiež naviazané na trojicu Si atómov, ktorá je však oproti trojici v prvej línii posunutá. Týmto spôsobom vznikne povrchová štruktúra so vzdialenosťou susedných atómov odmocninu z troch krát väčšou ako vzdialenosť atómov v (1x1).

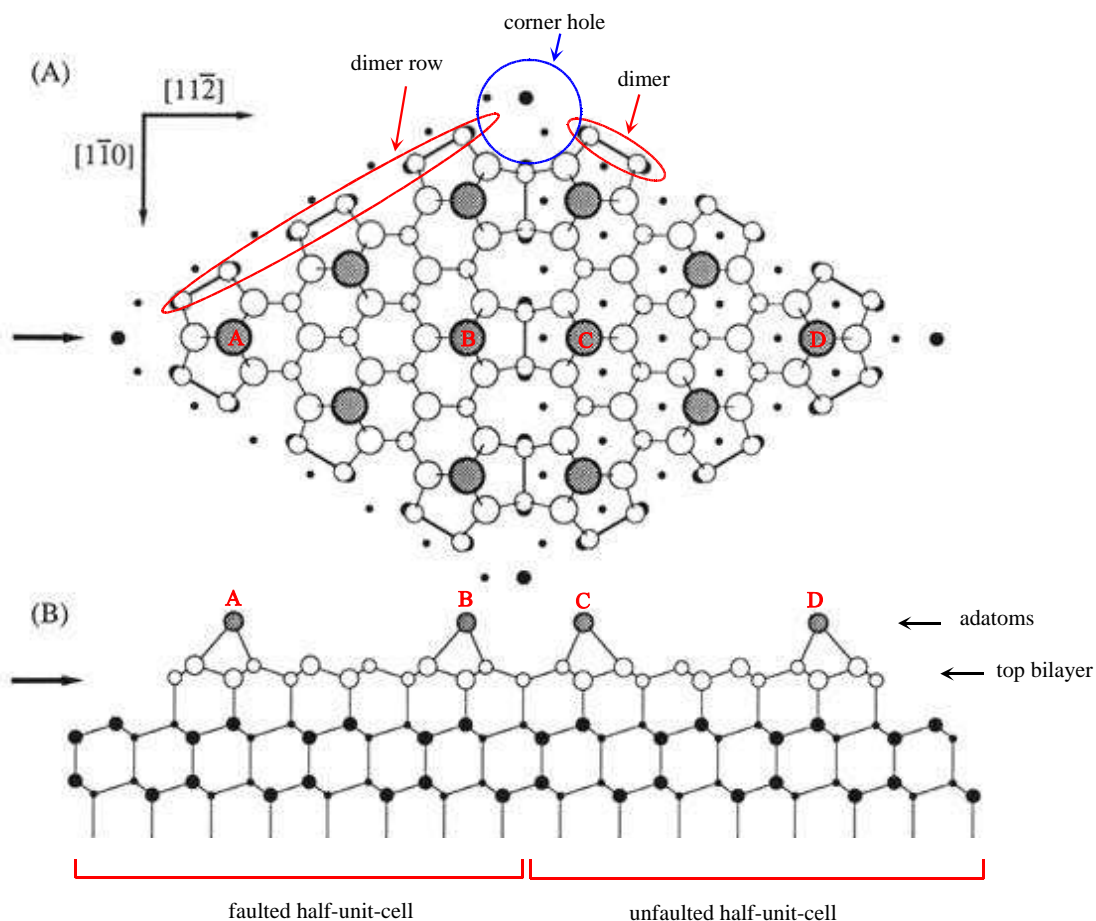
Čistá rekonštrukcia  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$  (v ktorej sa vyskytujú len atómy Si) sa však pozoruje len veľmi ojedinele. Častejšie sa pozoruje rast tejto rekonštrukcie pri heteroepitaxii kovov tretej skupiny, ktoré svojimi tromi väzbami plne saturujú voľné povrchové stavy. Okrem týchto prípadov, kde sa rekonštrukcia skladá z atómov jedného druhu je za vhodných podmienok na povrchu vytváraná mozaiková rekonštrukcia. V tomto type sa niektoré voľné povrchové väzby saturujú Si a niektoré inými atómami (najčastejšie trojväzbovými). Takéto usporiadanie je typické napríklad pre tálium, ako je vidieť z našich neskorších pozorovaní (obrázky 4.4 a 4.5)



Obr. 2.4: Rozmiestnenie adatómov voči základnej mriežke Si(111)-(1x1) v čistej rekonštrukcii  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$  (modré = Si atómy, červené = Si adatómy, vyznačená sú aj elementárna bunka  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ )

### 2.4.4. (7x7)

Je energeticky najvýhodnejšou a najstabilnejšou povrchovou rekonštrukciou Si(111). Definitívne určenie štruktúry tejto rekonštrukcie však vedcom zabralo viac ako 25 rokov výskumu. To svedčí o jej relatívnej komplikovanosti a komplexnosti [11, 12].



Obrázok 2.5 [13]: Schéma stavby rekonštrukcie Si(111)-7x7 (a: pohľad v smere kolmom na rovinu (111) b: pohľad z boku)

Základom rekonštrukcie sú dimérové línie atómov pootočené vzhľadom k sebe o  $60^\circ$  (obrázok 2.5). Tieto línie rozdeľujú celý povrch na trojuholníkové oblasti zvané half unit cells (HUC). Atómy v líniách sú súčasťou dimérového páru a teda majú saturovanú voľnú väzbu. Táto skutočnosť znamená, že pre adsorbované atómy predstavujú línie istú potenciálovú bariéru, keďže sú saturované viac ako zvyšok povrchu. Jednotlivé HUC sa ďalej delia na 2 podtypy: faulted HUC a unfaulted HUC. Faulted HUCs sú vzhľadom k objemovému usporiadaniu Si mierne posunuté (pri pohľade zhora sú atómy druhej dvojvrstvy umiestnené presne pod atómami povrchovej dvojvrstvy). Unfaulted HUCs zachovávajú objemové usporiadanie Si (pri pohľade zhora je možné vidieť aj atómy z druhej dvojvrstvy). Posun voči objemovému usporiadaniu je príčinou rozdielnosti hustoty elektrónových stavov týchto dvoch druhov HUC. Prakticky

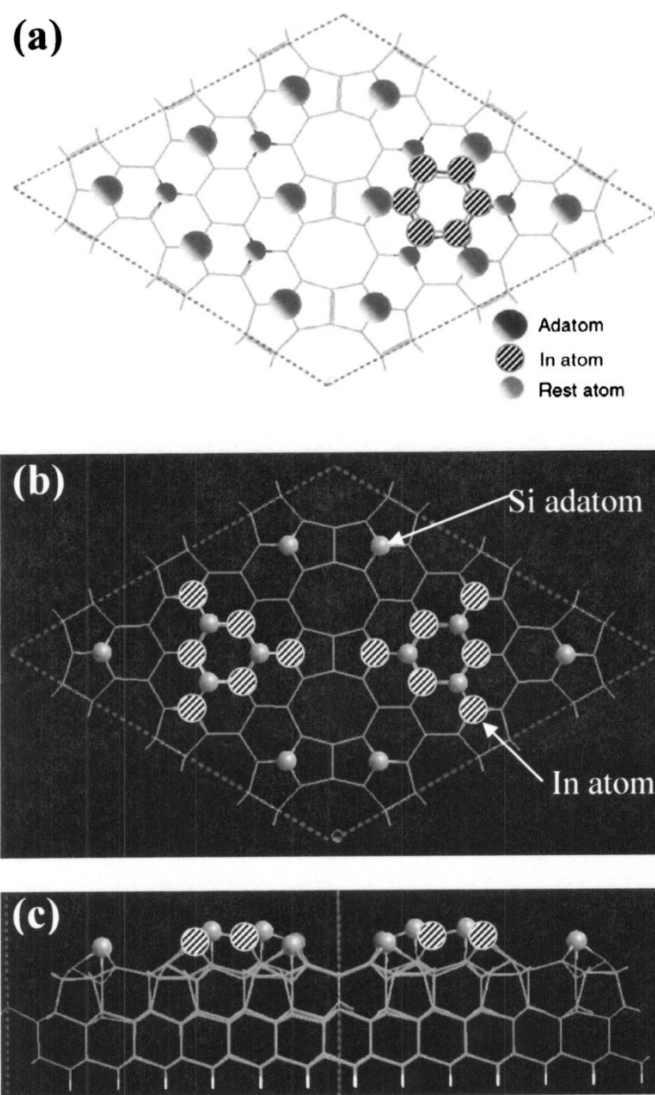
to znamená, že pri adsorpcii atómov na povrch Si(111)-7x7 môže byť pokrytie faulted a unfaulted rozdielne, pretože FHUC má vďaka spomínanému posunutiu voči objemovému rozloženiu vyššiu reaktivitu. Vzdialenosti medzi jednotlivými corner holes sú približne 2.7nm x 2.7nm (čo vyplýva z periodicity povrchu vzhľadom k (1x1) a vzdialenosti atómov v (1x1) rekonštrukcii).

Čo sa týka vertikálneho prierezu rekonštrukcie, tak základom pre rekonštrukciu je objemové usporiadanie, v ktorom rozoznávame dvojvrstvy rovnobežné s povrchovou rovinou (111). V poslednej dvojvrstve dôjde k dimerizácii atómov spomenutej vyššie. Vo vnútornej oblasti HUC ostáva pôvodná dvojvrstva v nezmenenom stave pričom vrchné atómy dvojvrstvy (rest atómy) majú jednu väzbu nesaturovanú. Celkovo je v jednej HUC 21 nesaturovaných väzieb, ktoré sa saturujú vrstvou adatómov (6 adatómov na každú HUC). Adatómy sa k rest atómom viažu tromi väzbami, pričom jedna ostáva nesaturovaná. Keďže 3 restatómy v každej HUC majú voľnú väzbu aj po naparení adatómov, pripadá na každú HUC celkovo 9 voľných väzieb. Mimo HUC je ešte jedna neobsadená väzba v každej corner hole.

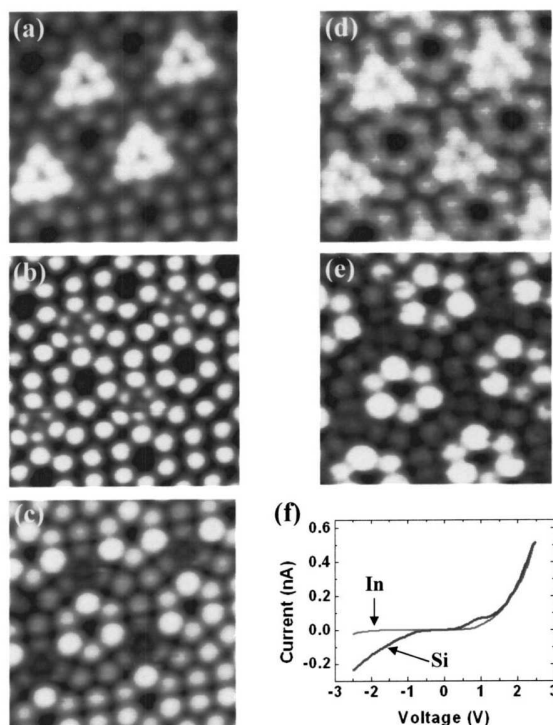
#### **2.4.5. Magické klastre na Si(111)-7x7:**

Ako bolo spomenuté vyššie (obr. 2.2), tak pri raste tenkých vrstiev sa pri určitých podmienkach stretávame s tvorbou 2D a 3D ostrovčekov (klastrov). Všeobecne je počet a rozmiestnenie klastrov na povrchu náhodné, no za určitých podmienok dochádza k tomu, že sa na povrchu vytvárajú periodicky rozmiestnené klastre s presne daným počtom atómov v nich. Takéto klastre sa nazývajú magické klastre [8,9,10]. Rekonštrukcia Si(111)-(7x7) vzhľadom k jej periodicite a skladbe z HUCs je ideálnou povrchovou mriežkou na tvorbu magických klastrov.

Po naparení istého množstva Al na povrch dochádza k obsadzovaniu rôznych pozícií v závislosti na energetickej výhodnosti. Najvýhodnejšie sú pozície na miestach s vysokou hustotou voľných povrchových väzieb (vytorením väzby dochádza k podstatnému zníženiu celkovej energie sústavy). Spomedzi rôznych možných konfigurácií usporiadania Al atómov vo vnútri HUC sa experimentálne zistilo (a počítačovými modelmi potvrdilo), že najvýhodnejšia štruktúra a teda štruktúra magických Al klastrov je štruktúra na obr. 2.6b/2.6c [8, 22].

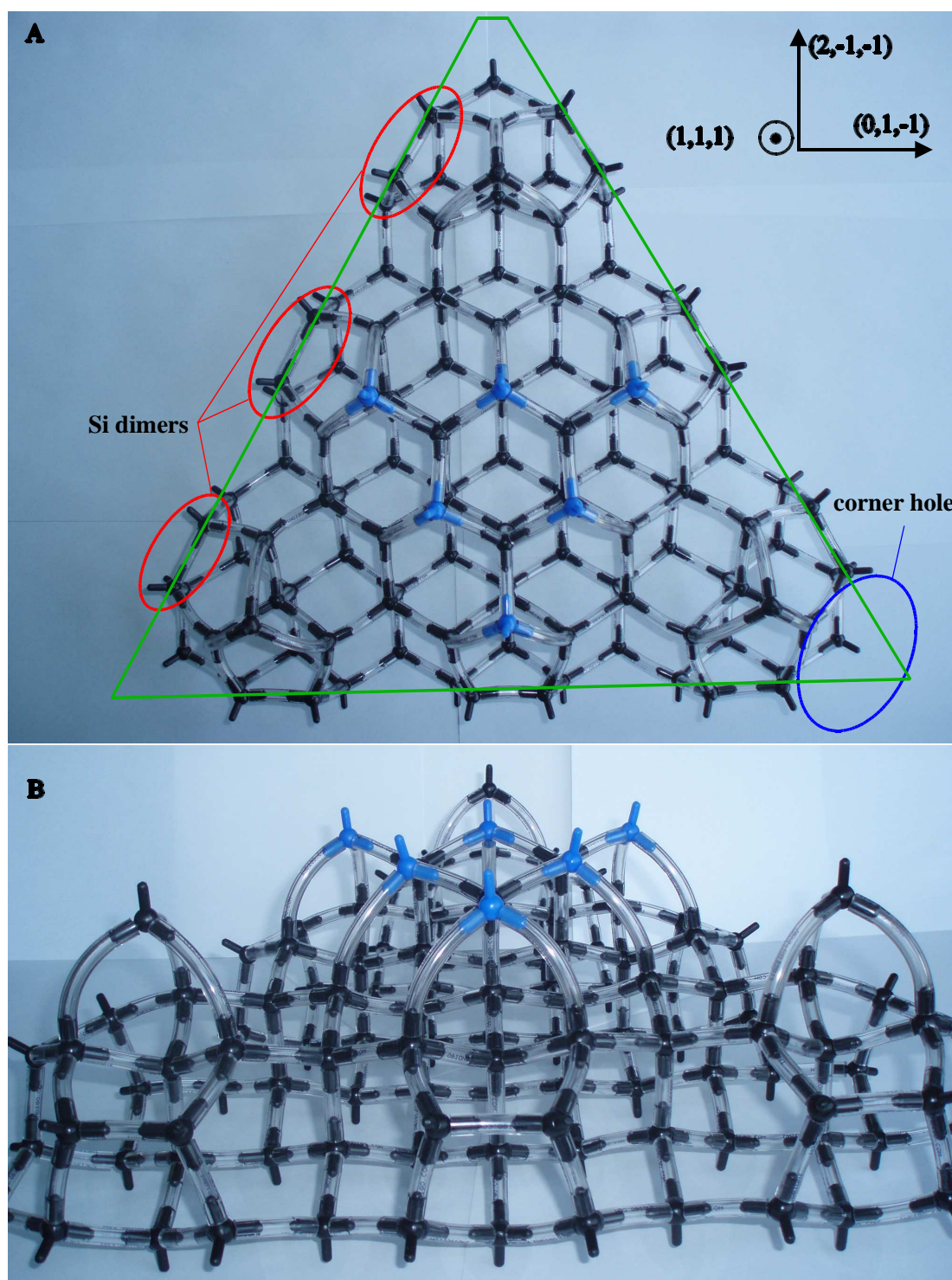


Obrázok 2.6 [8]: (a) starší štruktúrny model magického klastra, ktorý bol experimentálne vyvrátený (b,c) pohľad z vrchu a z boku na novší, experimentálne potvrdený model



Obrázok 2.7 [8]: Experimentálne dáta z STM potvrdzujúce model na obr.2.6 (b,c) (a-e) atomárne rozlíšené magické In klastre na Si(111)-(7x7) (rozmery obrázkov 5.5nmx5.5nm), napätia na hrote: (a) 0.6V (b) 0.2V (c)-0.3V (d) 0.5V (e) -0.3V, pričom (d,e) boli merané pri nízkej teplote (~90K). (f) voltampérové charakteristiky nad čistým Si a nad In magickým klastrom.

V magickom klastri na rekonštrukcii (7x7) tri adatómy v rohoch HUC ostali s jednou voľnou väzbou. Tri adatómy z centrálnej oblasti HUC sa posnuli ešte viac do stredu, pričom namiesto troch voľných restatómových väzieb saturujú už iba po jednej. Vzniknuté voľné restatómové väzby a nesaturované väzby Si centrálnych adatómov saturuje 6 Al, ktoré vytvárajú magický klaster. K ďalšiemu zníženiu celkovej energie systému môže prispieť aj prípadná substitúcia rohových kremíkových adatómov hliníkovými (jediné voľné väzby na povrchu tak ostanú v corner holes).



Obrázok 2.8: Zostavený model magického klastra na rekonštrukcii Si(111)-(7x7) pohľad z vrchu (A) na rovinu (111) a pohľad z boku (B): čierne sú Si atómy, modré sú Al atómy (voľná väzba znázornená na Al atómoch je nadbytočná)



#### 2.4.6. (5x5), (9x9) (všeobecne $(2n+1 \times 2n+1)$ ) a magické klastre na nich

V prípade ak dochádza k prekríženiu dimérových línií nie každé tri dimérové páry, ale každé 2 (5x5), prípadne 4 (9x9) a viac, dochádza všeobecne k tvorbe rekonštrukcií typu  $(2n+1 \times 2n+1)$ . Tie sa od základnej (7x7) líšia veľkosťou HUC a počtom a hustotou nesaturovaných väzieb na povrchu.

Rekonštrukcia (5x5) má v jednej HUC na vrchnej dvojvrstve celkovo 7 voľných restatómových väzieb. Na tri rohové sú naviazané adatómy, ktoré sú jasne rozlíšiteľné na STM obrázkoch pri záporných napätiach na hrote (obr. 4.22). V tomto stave sú na povrchu celkovo štyri nesaturované väzby na HUC (3 od Si adátomov a jeden od centrálneho rest atómu). Rovnako ako v prípade (7x7) je aj teraz možnosť, že po naparení Al dôjde k substitúcii Si rohových adátomov, čím sa zníži počet nesaturovaných väzieb na HUC na jednu (od centrálneho restatómu).

V rámci našej práce sme sa pred samotným zisťovaním možnosti vzniku magických klastrov na rekonštrukcii (5x5) pokúšali vytvoriť aspoň teoretický model usporiadania atómov Si a Al v magickom klastri s uvažovaním toho, že takýto magický klaster by musel spĺňať podmienku minimalizácie energie systému (za ekvivalentné tvrdenie sme pritom v našich úvahách pokladali podmienku minimalizácie počtu voľných väzieb (čo nemusí byť vždy pravda, ale vzhľadom k tomu, že zložitejšie modelovacie prostriedky sme k dispozícii nemali, je toto prvým priblížením)). S uvažovaním tejto podmienky sme navrhli tri teoretické modely (obr. 2.9) , pričom všetky podmienku spĺňajú.

V prípade modelov 1 a 2 došlo k tomu, že na centrálny rest atóm sa naviazal jednou väzbou atóm Si, po stranách potom došlo k naviazaniu Al na jednu voľnú väzbu centrálneho Si a dvoch voľných väzieb rest atómov (v prípade modelu 1 sú to dva rohové rest atómy, v prípade modelu 2 sú to dva rest atómy pri dimérovej línii HUC). Z hľadiska voľných väzieb teda došlo k poklesu a to zo štyroch na tri. Model zachoval všetky symetrie povrchu a z hľadiska geometrie má podobné usporiadanie ako časť magického klastra na (7x7).

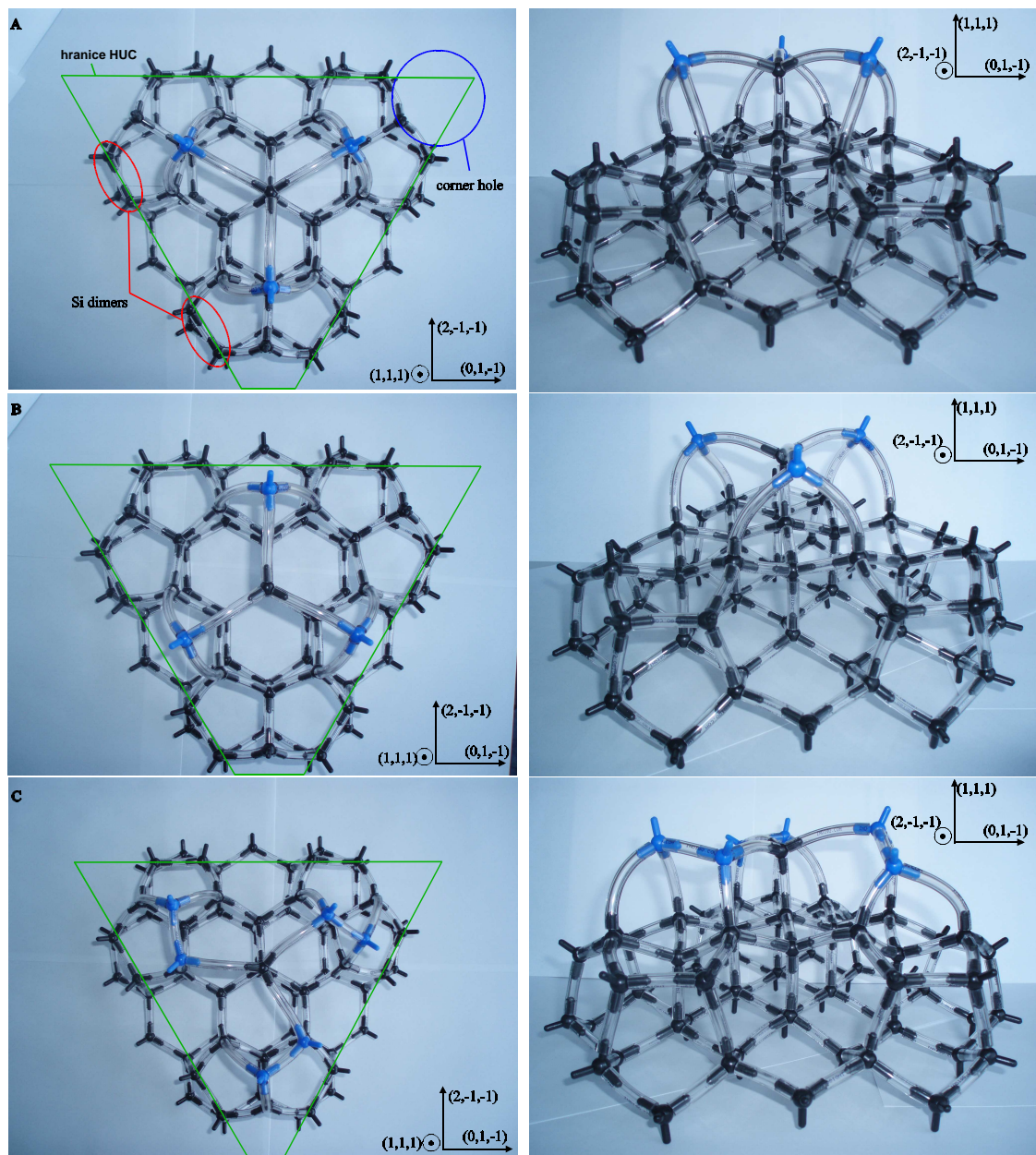
Tretí model všetky bodové prvky symetrie pôvodnej Si(111)-(5x5) nezachováva, naďalej však ostáva 3-čelná os symetrie (obr. 2.9-C). Rovnako ako v prvých dvoch prípadoch došlo k naviazaniu Si na centrálny restatóm. Al sa v tomto prípade viaže na rohový restatóm a jeden susedný restatóm. Voľnou väzbou sa potom



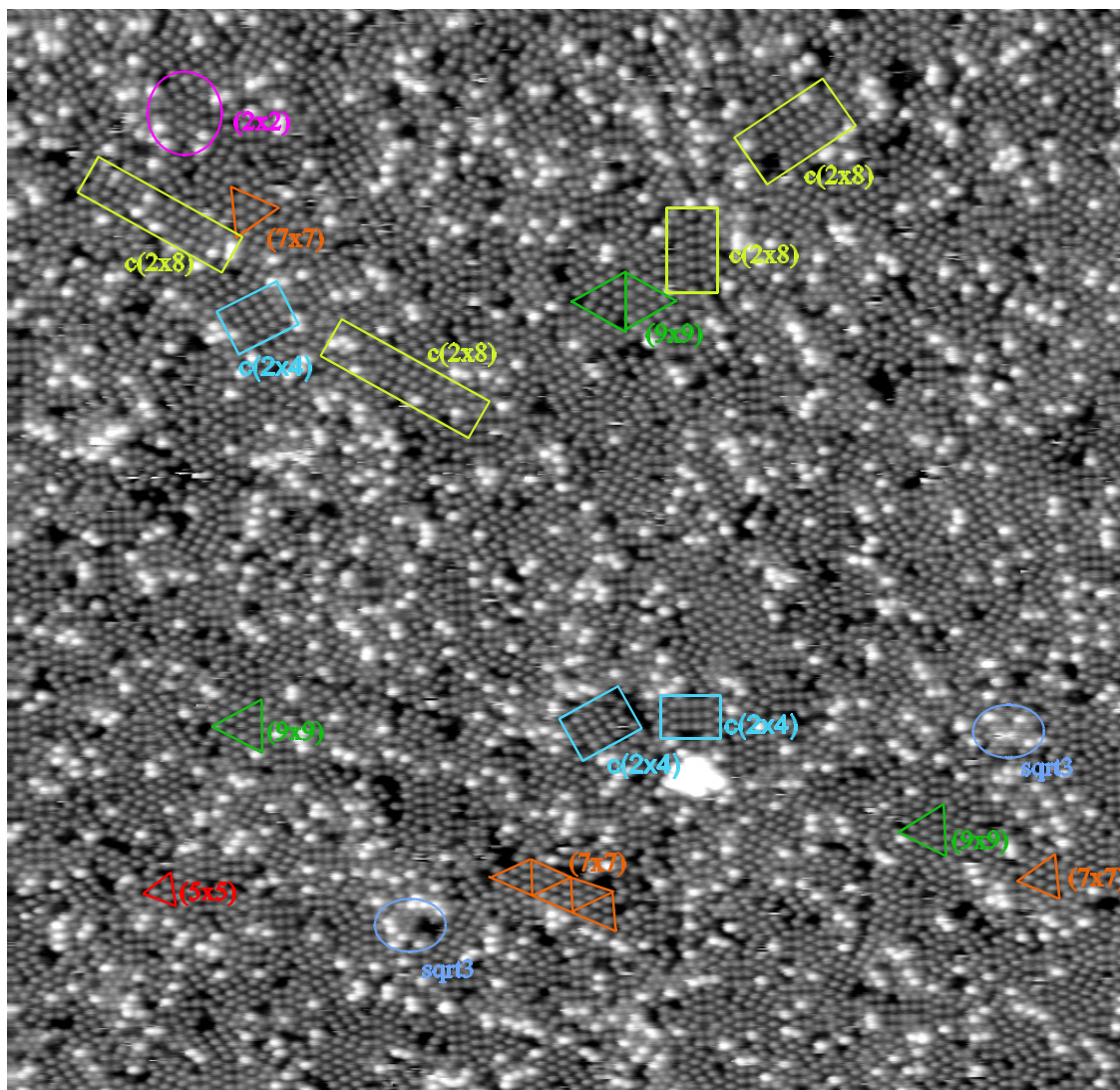
viaže na Al naviazaný na restatóm na vedľajšej strane HUC. Voľnou väzbou sa tento vedľajší Al naviaže na Si naviazaný na centrálny rest atóm. Týmto spôsobom dôjde k saturovaniu všetkých voľných väzieb v danej HUC.

Posledným možným usporiadaním (ktoré však už nemá charakter klastra Al atómov) je jednoduchá substitúcia Si adatómov hliníkovými. Predpokladáme, že ak sa niektorá z vyššie navrhnutých štruktúr v prírode vyskytuje, tak istým medzistupňom pri tvorbe týchto klastrov je práve stav, keď sú Si adatómy substituované Al. Z tohto usporiadania sa potom ďalej vyvíjajú vyššie spomenuté zložitejšie štruktúry. Za vhodných podmienok však systém môže ostať v tomto medzistupni a pozorovaná môže byť aj táto rekonštrukcia.

Z navrhnutých modelov nie je žiaden zatiaľ experimentálne overený. V prípade ak na rekonštrukcii (5x5) budú pozorované magické klastre, tak sa budeme snažiť jednotlivé modely potvrdiť, alebo vyvrátiť (ak nám to dostupná meracia technika umožní).



Obrázok 2.9: Navrhnuté modely magických klastrov na rekonštrukcii Si(111)-(5x5) :  
 čierne sú Si atómy, modré sú Al atómy (voľná väzba znázornená na Al atónoch je  
 nadbytočná)

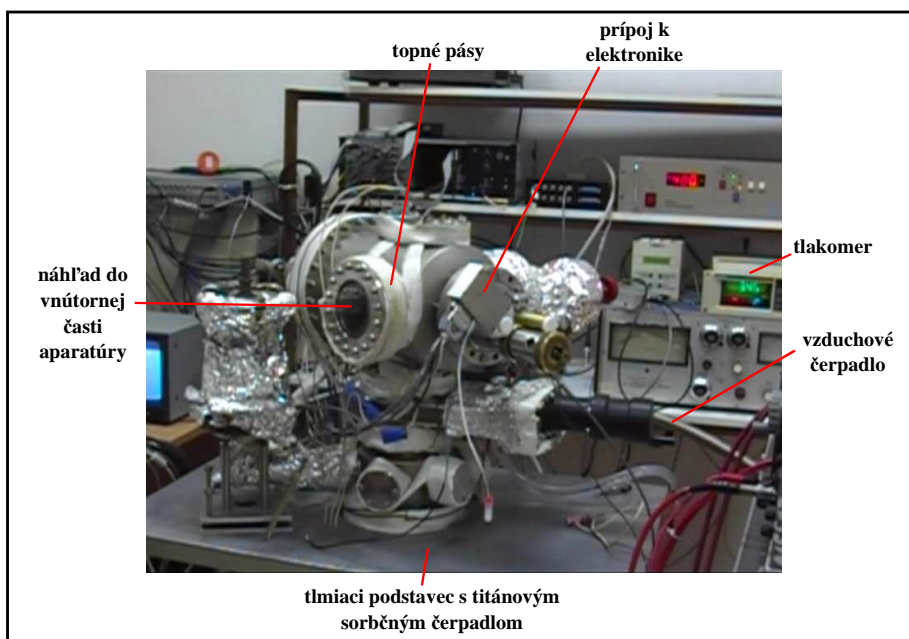


Obrázok 2.10: Povrch Si(111) s čiastočne zrekonštruovanými oblasťami (povrch bol pripravený z povrchu Si(111)-(7x7), na ktorý bola naparená 1ML tália, ktoré sa nechalo desorbovať pri teplote  $(360 \pm 10)^\circ\text{C}$ ). Rozmery zobrazenej oblasti sú 60x60nm, pokrytie na danej oblasti je 0,038ML, napätie na hrote pri meraní: -1V.

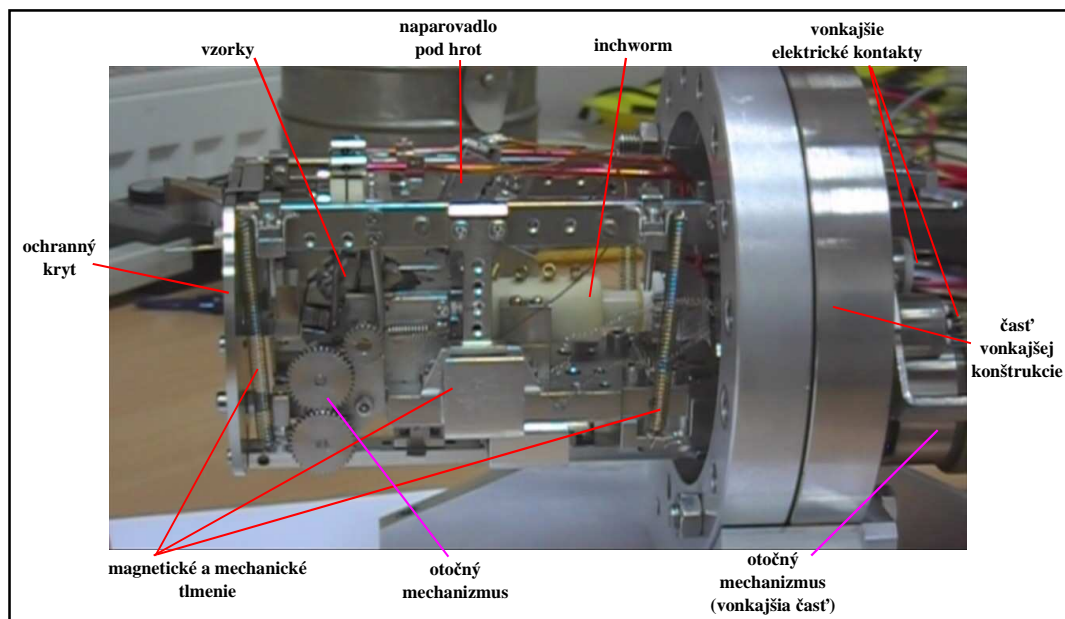


### 3. Popis experimentálnej aparatury STM:

Nasledujúce obrázky (3.1 a 3.2) sa vzťahujú k aparatúre, na ktorej sme vykonávali merania. Je umiestnená na Katedre povrchů a plazmatu Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Prahe. Konštruktérmi tejto aparatury sú *doc. RNDr. Ošřádal Ivan, CSc.* a *doc. RNDr. Sobotík Pavel, CSc.* .



Obr. 3.1: Popis vonkajšej časti STM



Obr. 3.2: Popis vnútornej časti STM

Ako je spomenuté vyššie, tak definované zmeny vnútorných a vonkajších parametrov dávajú experimentátorovi možnosť skúmať reakcie atómov na tieto zmeny. V STM aparatúre je určovanie všetkých týchto parametrov o to náročnejšie, že vnútorné prostredie sa udržiava v stave UHV, ktorý zabezpečuje dostatočnú čistotu substrátu a adsorbátu.

### 3.1. Naparovací systém:

Naparovanie požadovaného množstva a druhu častíc na povrch podložky zabezpečujú vyparovadlá umiestnené na strane protiľahlej k mikroskopovej časti aparatúry. Obidve časti sú od seba oddelené ochranným krytom, ktorý tieni elektrické a mechanické časti mikroskopu pred prúdom vyparených častíc.

Pri našom experimente boli používané 2 vyparovadlá (pre vyparovanie Al a Tl). Hliníkové vyparovadlo pozostávalo zo zafírovej trubičky ovinutej volfrámovým drôtom. Hliník sa nachádzal vo vnútri trubičky, pričom ohrev sa zabezpečoval prechodom prúdu cez ovinuté vlákno. Táliové vyparovadlo bolo vyrobené z tantalovej, na koncoch uzatvorenej, trubičky. Materiál sa vyparoval do priestoru cez malý otvor na strane trubičky nasmerovaný tak, aby prúd vyparených látok mieril prednostne na vzorku. Ohrev sa zabezpečoval priamym prechodom prúdu cez trubičku.

Vzdialenosť vyparovadiel od podložky bola v oboch prípadoch  $\approx 20\text{ cm}$ , čo pri rozmeroch skúmaných oblastí maximálne  $1\mu\text{m}$  a uvažení kosínusového rozdelenia vyparovaného materiálu do priestoru znamená, že odchýlka medzi pokrytiami jednotlivých oblastí bola maximálne  $152\text{ ppm}$ .

Pre rýchlosť vyparovania materiálu z taveniny  $R$  (počet častíc vyparených za jednotku času z jednotkovej plochy) platí:

$$R = \frac{p^*}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad (3.1)$$

kde  $p^*$  je tlak nasýtených pár vyparovaného prvku pri danej teplote,  $m$  je hmotnosť vyparovaných častíc,  $k$  je Boltzmanova konštanta a  $T$  je teplota vyparovadla.

### 3.2. Určenie množstva napareného materiálu:

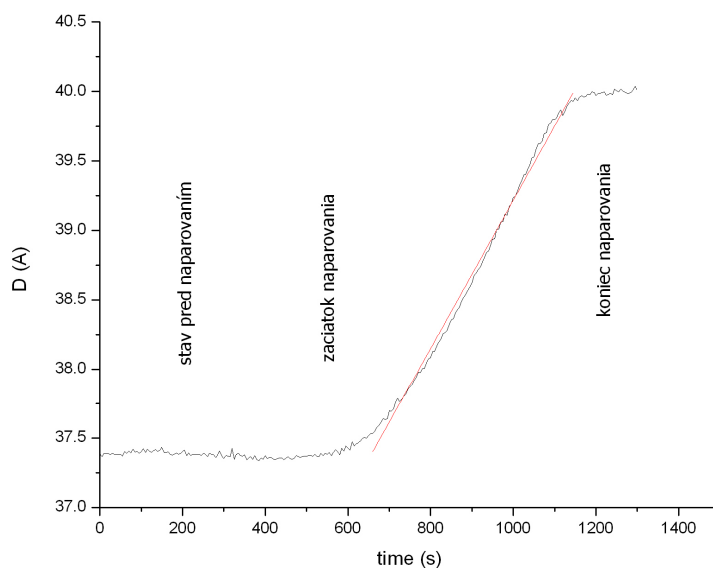
Na určovanie množstva napareného materiálu a stanovenie depozičnej rýchlosti slúži metóda „oscilujúceho monokryštálu“. Metóda je založená na tom, že okrem vzorky sa materiál naparuje aj na oscilujúci kryštál, ktorý je umiestnený v ekvivalentnej pozícii z hľadiska množstva napareného materiálu. Kryštál je neustále udržiavaný (striedavým napätím) v kmitavom pohybe na frekvencii vlastných kmitov. Naparením istého množstva materiálu sa však zmení hrúbka kryštálu, čo zapríčiní aj zmenu rezonančnej frekvencie kryštálu. Táto zmena sa dá merať a z nej spätne určiť zmena hrúbky kryštálu:

$$\frac{df_0}{dh} = -\frac{f_0^2}{N} \quad (3.2)$$

kde  $f_0$  je rezonančná frekvencia,  $h$  je hrúbka kryštálu.  $N$  je materiálová veličina vyjadrujúca frekvenčnú závislosť danej látky na hrúbke. V našom experimente bol použitý kremenný kryštál, pre ktorý má  $N$  hodnotu:

$$N \doteq 1.67 \cdot 10^6 \text{ Hz} \cdot \text{mm} \quad (3.3)$$

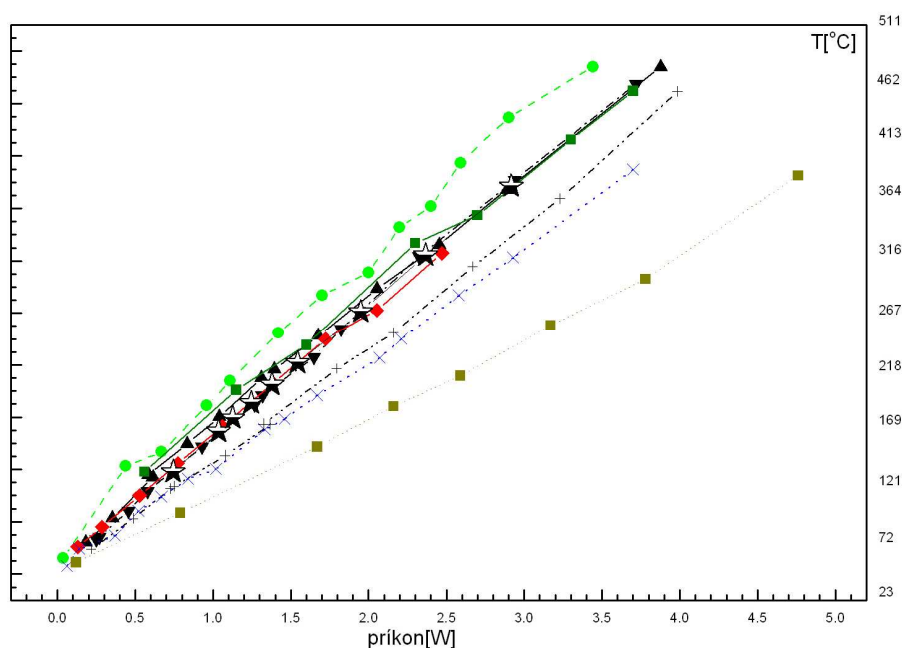
Na základe týchto dvoch vzťahov sa dá určiť množstvo napareného materiálu.



Graf 3.1: Typický záznam z výstupu oscilujúceho kryštálu pri naparovaní vrstvy tália (nafitovaná lineárna časť naparovania má smernicu  $0.32\text{\AA}/\text{min}$ , čo predstavuje naparovaciu rýchlosť približne  $0.14\text{ML}/\text{min}$ . (ak zoberieme do úvahy, že doba naparovania (z grafu) bola približne 7 minút, tak potom celkové naparené množstvo bolo približne  $1\text{ML}$  tália))

### 3.3. Meranie teploty podložky:

Ohrev vzorky sa zabezpečuje priamym prechodom jednosmerného prúdu cez vzorku. Meranie teploty ohrevu podložky sa priamo pri experimente nevykonáva. Počas meraní sa zaznamenáva len hodnota zahrievacieho príkonu, ktorý bol privedený na podložku. Na konci jedného experimentálneho obdobia sa potom pomocou termočlánku pripevneného priamo na podložku príslušným hodnotám zaznamenaného prúdu priradia hodnoty teploty. Táto kalibrácia sa vykonáva len raz za obdobie niekoľkých mesiacov, no v prípade, že sa na experimentálnej aparatúre nič nemení a používajú sa podobné vzorky substrátu, tak je z predošlých kalibrácií možné približne odhadnúť teplotu vzorku aj hneď.



Graf. 3.2: Príklad kalibračných kriviek pre rôzne vzorky použité v našej STM aparatúre v minulosti

### 3.4. Vákuový systém STM:

Pre správny a dlhodobu udržateľný chod STM je potrebné v aparatúre dosiahnuť podmienok UHV (ultra high vacuum). Bežne sa za takéto podmienky považuje oblasť s tlakmi nižšími ako  $10^{-7}$  Pa. STM je však mimoriadne citlivé na prípadné povrchové nečistoty a poruchy vyvolané príchastým dopadom molekúl vzduchu na povrch substrátu.

Z toho dôvodu bol v našej aparátúre počas celého merania udržiavaný tlak nižší ako  $10^{-7} \text{ Pa}$  iba v čase, keď dochádzalo k ohrevu vzorky, vyparovadla a pod. V bežnom prevádzkovom režime, v ktorom sa uskutočňovalo meranie sa tlak stabilne udržiaval na hodnote nižšej ako  $2 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}$ ). V praxi aj takéto zníženie použitého tlaku znamená podstatné zlepšenie kvality povrchu, ktoré je udržateľné na dlhšiu dobu (jedna ML sa pri tlaku  $2 \cdot 10^{-7} \text{ Pa}$  vytvorí za rádovo hodiny; desaťnásobným znížením tlaku sme čas na vytvorenie jednej ML predĺžili na rádovo desiatky hodín [14]. To zabezpečovalo dostatok času na meranie predtým, ako bola vzorka znehodnotená zvyškovou atmosférou v aparátúre.

Aby bolo takýto vysoký stupeň vákua možné dosiahnuť, tak naša meracia zostava bola vybavená viacstupňovým čerpacím systémom. Prvotné sčerpanie aparátúry z atmosférického tlaku zabezpečovala membránová výveva, ktorá pracuje v oblasti turbulentného prúdenia vzduchu a je schopná znížiť tlak na jednotky  $\text{Pa}$ .

Ďalším čerpacím stupňom bola turbomolekulárna výveva, ktorá pracuje na princípe udeľovania hybnosti jednotlivým molekulám zbytkovej atmosféry a ich urýchľovania smerom von z aparátúry. Tlaky dosiahnuteľné touto vývevou sú rádovo  $10^{-4} \text{ Pa}$ . Za takéhoto tlaku sa zapoja do činnosti topné pásy (obr. 3.1) obopínajúce vonkajšiu kostru aparátúry. Vypekanie aparátúry je nutné z dôvodu, že pri tlaku  $10^{-4} \text{ Pa}$  je ďalšie znižovanie tlaku znemožnené uvoľňovaním plynov z vnútorných stien vákuovej nádoby a uvoľňovaním plynov rozpustených v samotných stenách aparátúry. Zvýšením teploty sa tento proces urýchlí (bez vypekania by čerpanie aparátúry trvalo niekoľko mesiacov, s použitím vypekacieho procesu je to niekoľko dní. Nasledujúci (Frenkelov) vzťah určuje strednú dobu pobytu častice na povrchu  $\tau$ :

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{q}{kT}} \quad (3.4)$$

kde  $\tau_0$  je stredná perióda kmitov viazanej častice v smere kolmom k povrchu ( $\approx 10^{-14} - 10^{-13} \text{ s}$ ),  $q$  je energia potrebná na desorbciu častice s povrchu,  $k$  je Boltzmannova konštanta a  $T$  je termodynamická teplota podložky. Z tohto vzťahu je jasné, že aj malým zvýšením teploty dokážeme výrazne skrátiť strednú dobu pobytu častíc na povrchu, čo sa prakticky využíva pri vypekaní aparátúry.

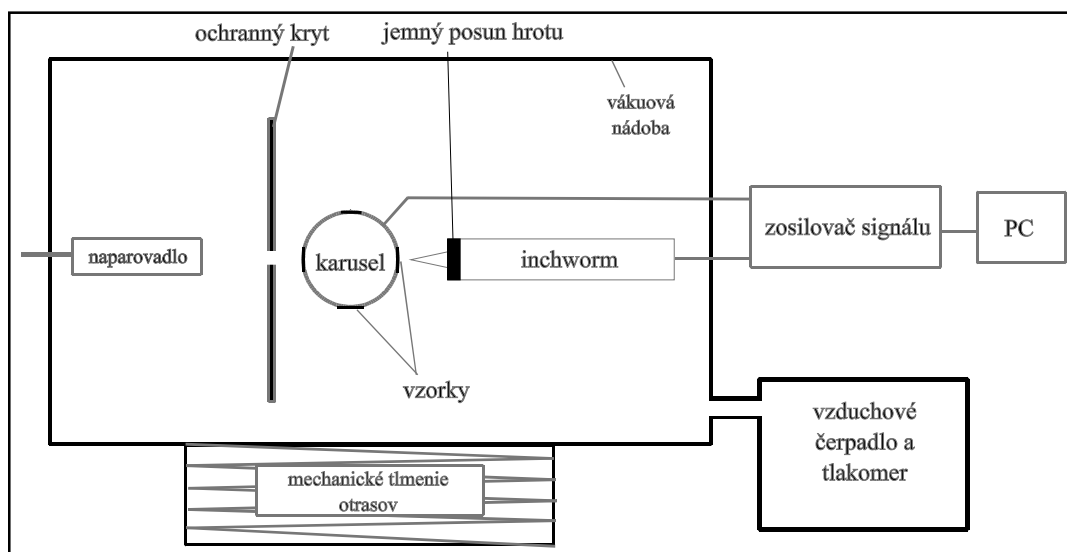


Teplota „vypekania“ je však limitovaná mikroskopom STM umiestneným vo vnútri, ktorý obsahuje keramické a teplotne málo odolné materiály (lepidlá a pod.), ktoré obmedzujú vypekáciu teplotu na približne (130 °C).

Po odčerpaní uvoľnených plynov sa zapojí titánová sorpčná výveva, ktorá zníži tlak na požadovanú úroveň. Sorpčná výveva sa používa aj v priebehu experimentálneho obdobia na udržiavanie stálych UHV podmienok, pretože neobsahuje žiadne pohyblivé časti, ktoré by mohli spôsobiť nežiaduce mechanické otrasy.

### 3.5. Popis zobrazovacej časti STM:

Aparatúra STM je určená na zobrazovanie povrchu vodivých materiálov na atomárnej úrovni. Využíva pri tom kvantový efekt tunelového prúdu, ktorý sa meria a na základe jeho veľkosti sa určuje rozloženie voľných resp. obsadených elektrónových stavov na povrchu daného materiálu.



Obr. 3.3: Schéma usporiadania STM

Medzi hrot a povrch je dané elektrické napätie, ktoré vytvára spomínaný tunelový prúd. Ten sa v závislosti na vzdialenosti od povrchu exponenciálne mení ( $I \approx e^{-kz}$ , pričom  $k \approx 0,22 \text{ nm}^{-1}$  a  $z$  je vzdialenosť od povrchu).

Približný kvantovo-mechanický vzťah pre veľkosť tunelového prúdu tečúceho hrotom má takýto tvar [17,18]:

$$I_{s \rightarrow t} \approx -\frac{4\pi e}{\hbar} \int_{-eV}^0 |M|^2 \rho_s(\varepsilon) \rho_t(\varepsilon + eV) d\varepsilon \quad (3.5)$$

Kde  $I$  je tunelový prúd a  $\rho_s(\varepsilon)$  je hustota obsadených elektrónových stavov vzorku na energii  $\varepsilon$ ,  $\rho_t(\varepsilon + eV)$  je hustota neobsadených stavov hrotu na energii  $(\varepsilon + eV)$  a  $M$  je maticový element definovaný ako  $|M|^2 = e^{-2\gamma}$ , kde:

$$\gamma = \frac{s\sqrt{2m\varphi}}{\hbar} \quad (3.6)$$

kde  $m$  je hmotnosť elektrónu,  $s$  je vzdialenosť hrotu od vzorku a  $\varphi$  je hĺbka potenciálovej bariéry.

Typická vzdialenosť hrotu od povrchu sa pohybuje v rozmedzí 0.4–0.7 nm. Mikroskop môže pracovať v dvoch módoch: buď v nastavení keď sa fixuje jedna súradnica (najlepšie tak aby sa koniec hrotu pohyboval po ploche vo vhodnej vzdialenosti od povrchu, ktorá je s ním rovnobežná) a merajú sa zmeny tunelového prúdu, alebo v nastavení kde sa udržiava konštantný tunelový prúd a v závislosti na ňom sa upravuje poloha hrotu. Docielenie konštantnosti prúdu sa pritom dosiahne spätnoväzobným obvodom, ktorý v závislosti a nameraných hodnotách upravuje polohu hrotu a tým aj veľkosť prúdu.

Keďže vzdialenosť hrotu od povrchu sa počas merania pohybuje rádovo v zlomkoch nanometrov, je potrebné nájsť spôsob akým je možné definovane hýbať hrotom na takto malých vzdialenostiach. V praxi sa používajú piezoelektrické materiály, ktoré dokážu generovať mechanickú silu po vložení do vonkajšieho elektrického poľa. Praktickosť piezoelektrických materiálov spočíva hlavne v tom, že veľkosť posunu závisí na veľkosti napätia, ktorým sa vytvára elektrostatické pole. Veľkosť napätia je dobre regulovateľná aj pri veľmi malých hodnotách, čo umožňuje uskutočniť aj veľmi malé posuny, ktoré sú pri meraní potrebné.

### **3.6. Čistota použitého materiálu:**

Metóda STM je určená na zobrazovanie elektrónových stavov na povrchu vodivého materiálu. Aby bolo možné použiť kremík ako substrát pre meranie na STM je nutné upraviť ho dopovaním vhodným množstvom donorových , alebo akceptorových atómov. V našom experimente sme používali Si dopovaný Sb, pričom použité množstvo bolo 0.01% v objeme Si. To znamená, že ak predpokladáme, že objemové a povrchové koncentrácie daného dopantu sú aspoň rádovo rovnaké, tak na jeden Sb atóm na povrchu pripadá 10 000 Si. V prípade obr. 2.10 by to napríklad znamenalo, že na zobrazenej časti povrchu sú približne 2 atómy Sb.

## 4. Výsledky merania:

### 4.1. Metodika merania:

Základnou metódou skúmania pripravených povrchov bola skenovacia tunelová mikroskopia, z čoho plynú aj možnosti metód prípravy vzoriek a spôsob vyhodnocovania nameraných dát.

Povrchy boli pripravované z monokryštalického kremíka s povrchovým rezom (111). Tento povrch sa nechal zvýšením teploty zreorganizovať tak, aby sa vytvorila súvislá rekonštrukcia (7x7). Konkrétny ohrev prebiehal vo väčšine prípadov v dvoch fázach. V prvej fáze bola teplota ohrevu približne 1200°C, čo zabezpečilo spoľahlivé vyčistenie vzorku a dodanie dostatočnej energie na to, aby sa zrušili všetky povrchové rekonštrukcie prítomné na povrchu pred meraním. Tento prvotný ohrev sa opakoval viackrát.

V druhej fáze sa povrch ohrial na nižšiu teplotu ( $\approx 600^{\circ}\text{C}$ ), ktorá však bola stále dostatočná na to, aby zaručila rozrušenie väzieb starých povrchových rekonštrukcií. Z tejto teploty sa však na rozdiel od prvej fázy vzorka nenechala chladnúť skokovo, ale pomocou tzv. „ramp downu“ sa teplota vzorky pomaly znižovala až na izbovú teplotu. Druhá fáza s pomalým schladením vzorky mala zaručiť, že sa celý povrch stabilne zrekonštruje do (7x7) usporiadania a že nezrekonštruované oblasti budú čo najmenšie (problémom pri rýchlom schladení je to, že niektoré atómy môžu aj napriek tomu, že na začiatku mali dostatočnú energiu „uviaznuť“ v lokálnom potenciálnom minime a rozrušiť tým v danej oblasti rekonštrukciu (7x7).

Po schladení na izbovú teplotu sa na zrekonštruovaný povrch nadeponovalo vhodné množstvo tália. Tálium svojou prítomnosťou na povrchu rozrušuje dovtedy ustálené rekonštrukcie, takže ak sa povrch opätovne ohreje a tálium desorbuje z povrchu, pôvodné usporiadanie sa zmení. Teplota desorpcie tália je podstatne nižšia ako teplota, pri ktorej sa na povrchu vytvorí stabilná (7x7) (na prípravu povrchov s metastabilnými rekonštrukciami sme používali teplotu 450 – 500°C, ktorá vyplynula z našich meraní uvedených v ďalšej časti práce). Z dôvodu, že použitá teplota ohrevu vzorku je nedostatočná na ustálenie atómov do rekonštrukcie (7x7) sa po desorbcií lokálne vytvárajú oblasti, ktoré sa nedokázali dostať do úplného energetického minima,

ale ostávajú v tzv. metastabilnom stave (napr. rekonštrukcia (5x5)). Dôvodom vytvorenia rekonštrukcie (5x5) namiesto (7x7) je zhodnosť povrchovej koncentrácie atómov rekonštrukcie (5x5) s plošnou koncentráciou atómov v jednotlivých vrstvách (111) v objeme Si. Na vytvorenie usporiadania (5x5) je teda potrebná len malá energia a povrch sa do tohto stavu dostáva pri odstránení medzivrstvových väzieb samovoľne. Príkladom metódy prípravy globálne zrekonštruovaného povrchu Si(111)-(5x5) je štiepenie Si o vákuu s následným ohrevom [20]. Tento proces je vlastne spomínané odstránenie medzivrstvových väzieb, ktoré vedie na povrchovú rekonštrukciu (5x5). Z [16] vyplýva, že naparenie tália a jeho následná desorpcia majú na povrch Si(111)-(7x7) podobný vplyv ako štiepenie Si vo vákuu a teda, že sa (aspoň lokálne) tvorí rekonštrukcia (5x5).

Po vytvorení povrchu, na ktorom síce stále prevažuje rekonštrukcia (7x7), ale lokálne sa vyskytujú aj metastabilné rekonštrukcie (5x5), (9x9) a iné sme uskutočnili deponovanie rôznych množstiev Al. Snažili sme sa docieľiť to, aby na povrchu vznikali stabilné plne obsadené magické klastre Al, avšak z hľadiska kvality merania sa ukázalo, že dané množstvo, kedy je povrch práve pokrytý plne obsadenou sieťou magických klastrov nie je dobré prekračovať, pretože nad touto hranicou sa na povrchu začali klastre spájať a vytvárať nerovnosti, ktoré výrazne ovplyvňovali kvalitu snímania hrotu.

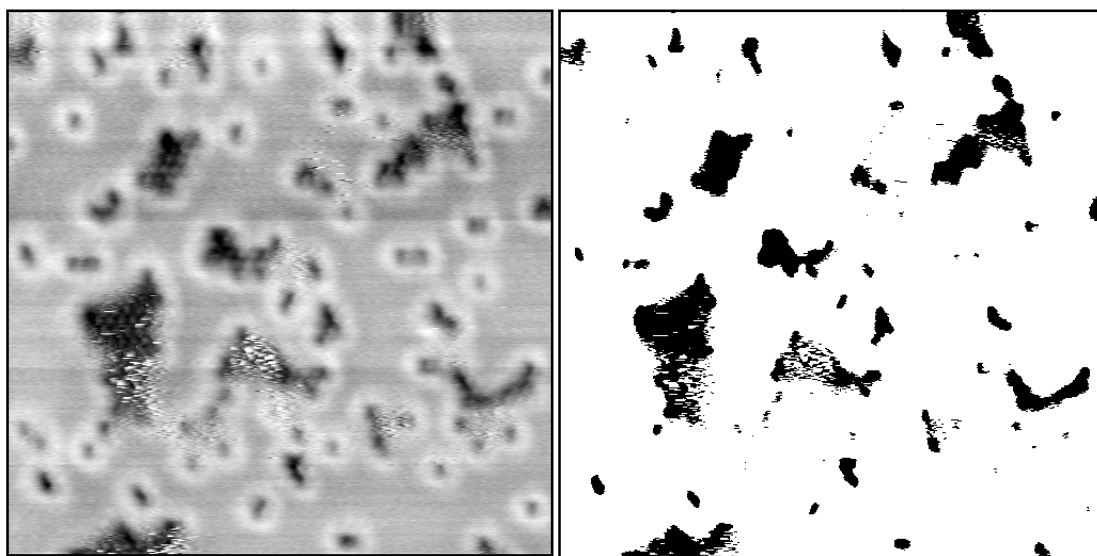
Pri samotnom meraní sme sa snažili získať čo najviac dát z oblastí s metastabilnými rekonštrukciami, aby bolo možné porovnať správanie sa adsorbátu voči jednotlivým rekonštrukciám. Z predchádzajúcich experimentov sme mali skúsenosť, že spomínané metastabilné rekonštrukcie vznikajú hlavne v oblastiach, ktoré sa nachádzajú v blízkosti atomárnych schodov a čiastočne nezrekonštruovaných častí povrchu. Zamerali sme sa preto práve na ne.

Namerané dáta boli následne spracovávané programom Gwyddion [15], ktorý je priamo určený na spracovanie dát zo skenovacích mikroskopov. V ďalších častiach práce sú uvedené spracované obrázky. Spracovanie spočívalo hlavne v zvýraznení existujúcich štruktúr a odstránení šumu spôsobeného mikroskopom. Dodatočné úpravy obrazu meniace štruktúru povrchu neboli vykonávané.

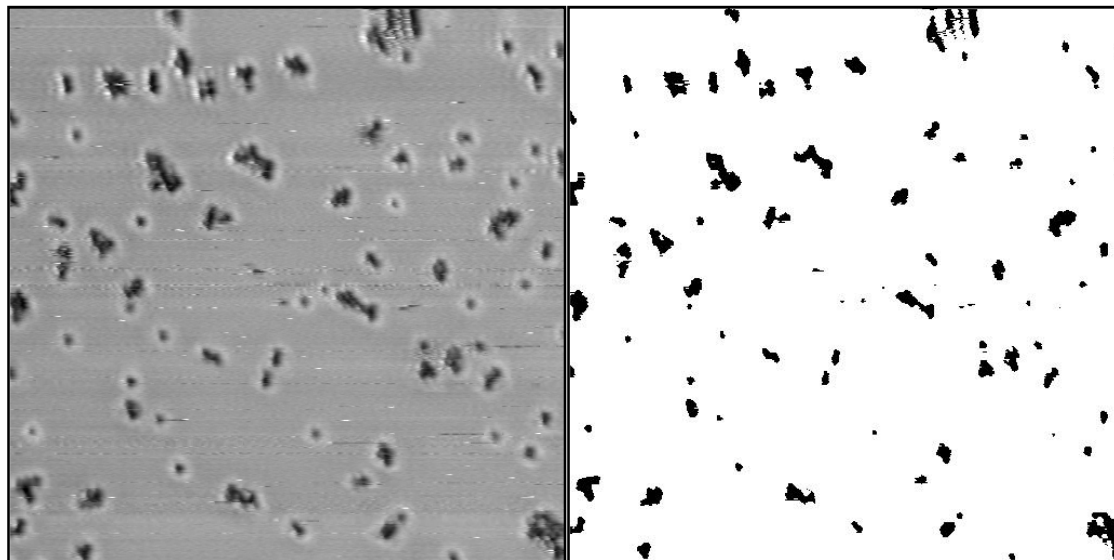
## 4.2. Príprava povrchu s metastabilnými rekonštrukciami

Ako bolo spomenuté vyššie, tak metastabilné rekonštrukcie na povrchoch vznikajú pri rôznych procesoch (prudké schladenie povrchu po zohratí, alebo naparení materiálu, homoepitaxia na Si, desorbcia tália). Spomedzi uvedených sme si ako metódu prípravy vybrali naparovanie tália s jeho následnou postupnou desorbciou z povrchu. Nasledujúca séria obrázkov popisuje ako sa mení nami pripravený povrch.

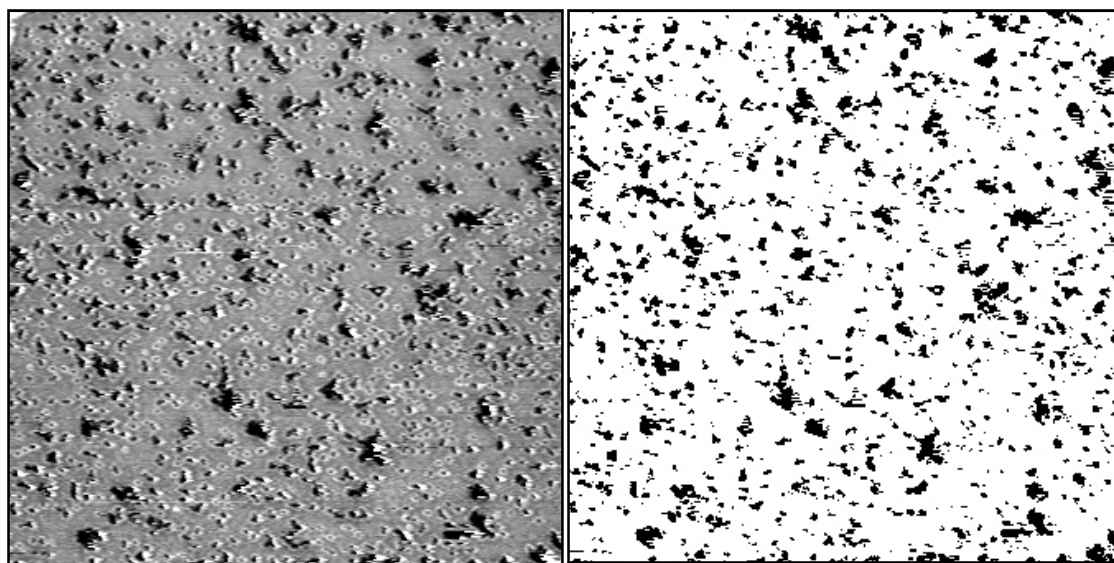
Po ustálení teploty sme na povrch naparili požadované množstvo tália (ak nebude uvedené inak, tak naparené množstvo bolo 1ML). Následným ohrevom sme sa snažili čo najpresnejšie stanoviť teplotu, pri ktorej dochádza k desorbcií tália. Určenie teploty desorbcie bolo kritické z dôvodu, že práve v teplotnej oblasti, v ktorej tálum desorbuje dochádza pod vplyvom zmeny teploty a povrchového pokrytia k zmene povrchových rekonštrukcií plynule z (1x1), cez Si-Tl mriežku ( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ), povrch so zmesou metastabilných rekonštrukcií (obr. 2.10), postupne až k stabilnej rekonštrukcii (7x7). Vývoj rekonštrukcií pri popísanom meraní je zachytený na nasledujúcom slede obrázkov (ľavý obrázok je vždy obrázok získaný STM, pravý obrázok je vždy maska použitá na odhad pokrytia povrchu táliom pri danom meraní, pričom pri každej sérii obrázkov príslušnej jednému dňu merania je uvedený spôsob prípravy, určené pokrytie, prevažujúci typ rekonštrukcie, rozmery zobrazenej oblasti a napätie na hrote STM použité pri meraní):



Obrázok 4.1: pokrytie 0.89 ML (30x30 nm, -0.6V)

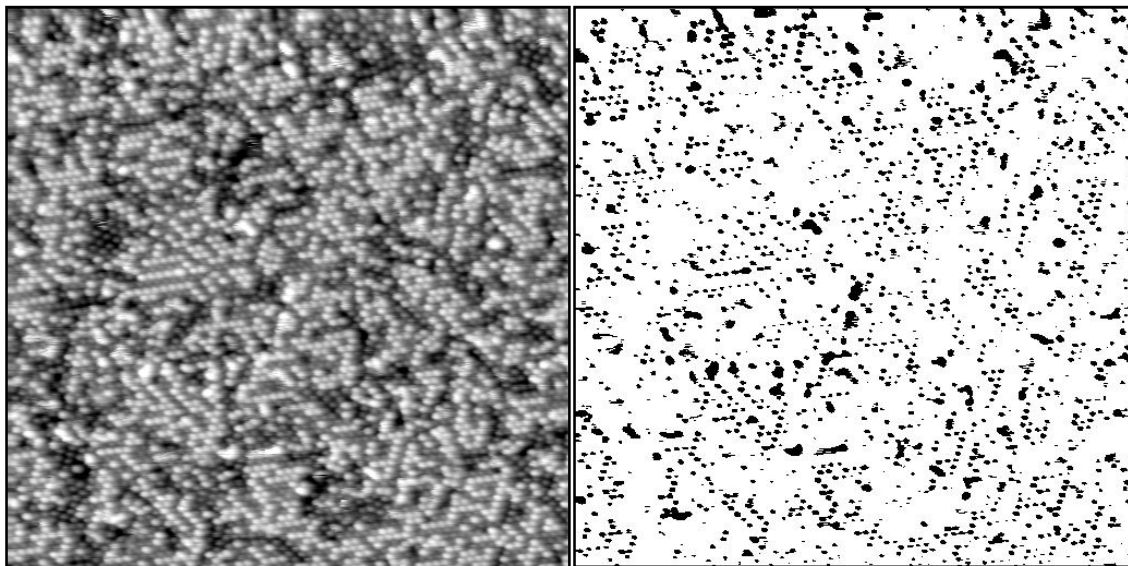


Obrázok 4.2: pokrytie 0.96 ML (40x40 nm, -0.5V)

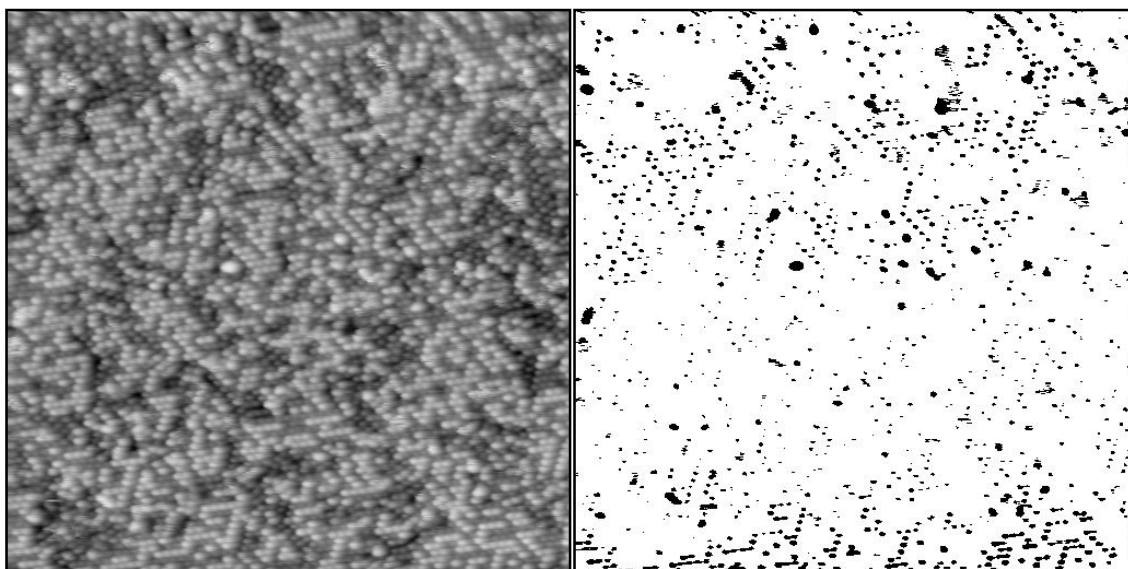


Obrázok 4.3: pokrytie 0,87 ML (130x130 nm, -0.5V)

Povrchy na obrázkoch 4.1 - 4.3 boli po schladení na izbovú teplotu zahriate na teplotu  $\approx 280^{\circ}\text{C}$ . Prevažujúcou rekonštrukciou je (1x1) (oblasti pokryté TI sú na maskách označené bielou farbou). Priemerné pokrytie:  $(0,91 \pm 0,05) \text{ ML}$ .



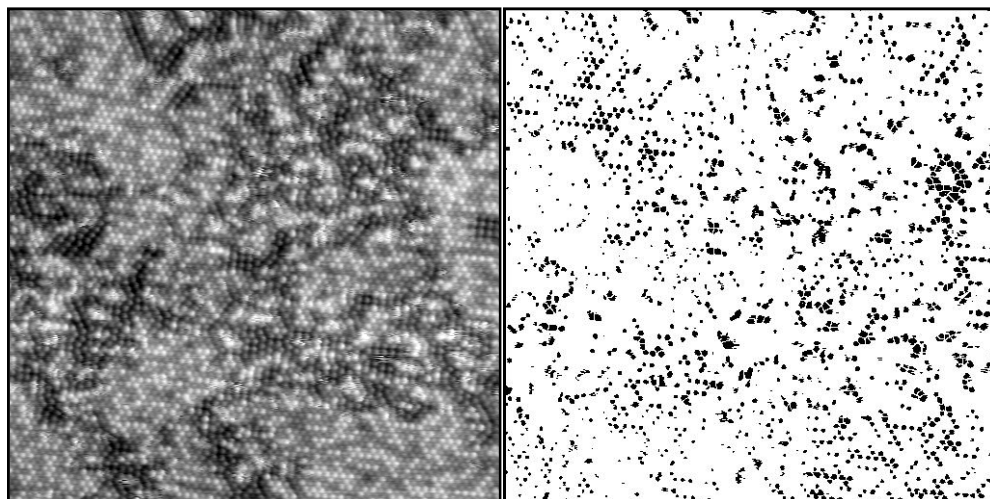
Obrázok 4.4: pokrytie 0.15 ML (40x40 nm, +1V)



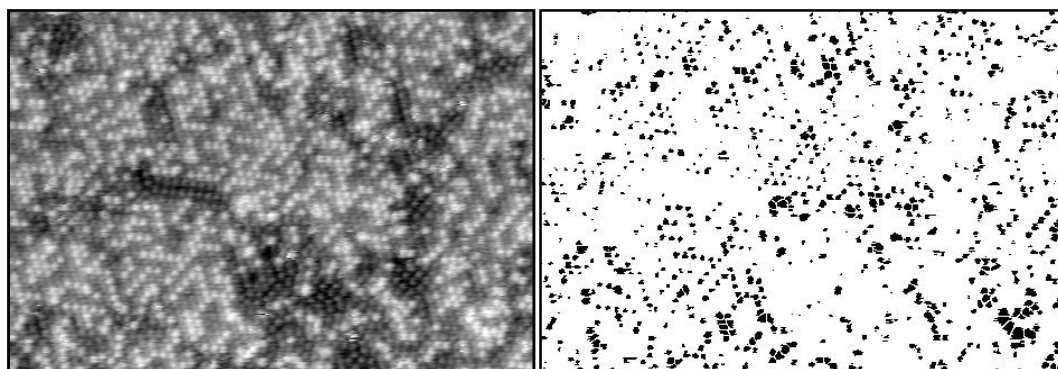
Obrázok 4.5: pokrytie 0.13 ML (40x40 nm, +2V)

Povrchy na obrázkoch 4.4 – 4.5 boli po schladení na izbovú teplotu zahriate na teplotu  $\approx 330^{\circ}\text{C}$ . Prevažujúcou rekonštrukciou je mozaika ( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ), v ktorej sa striedajú atómy tália (na pravom obrázku svetlejšie [19]) a kremíku (na pravom obrázku tmavšie). Priemerné pokrytie:  $(0,14 \pm 0,03) \text{ ML}$ .

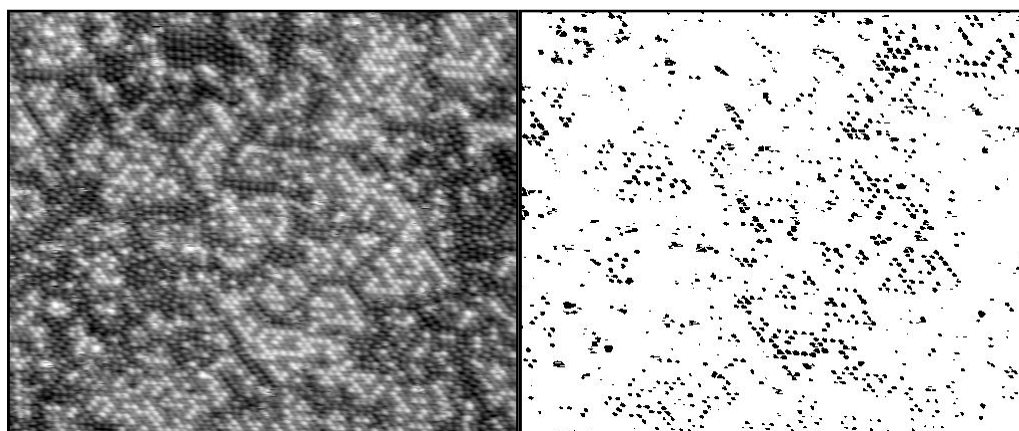




Obrázok 4.6: pokrytie 0.21 ML (30x30 nm, -2V)

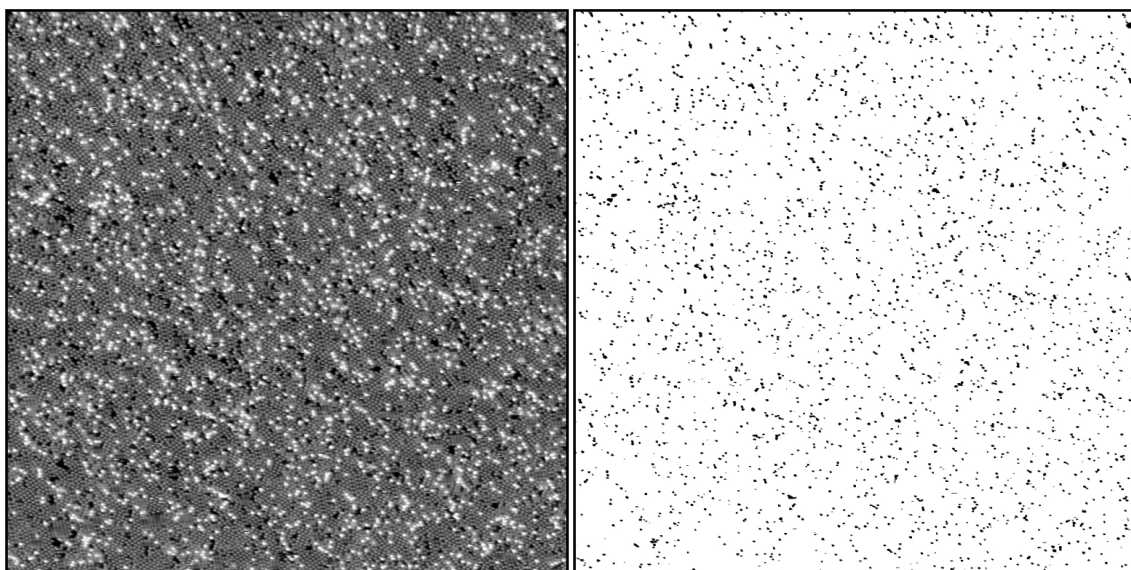


Obrázok 4.7: pokrytie 0.22 ML (27,5x18 nm, -1V)

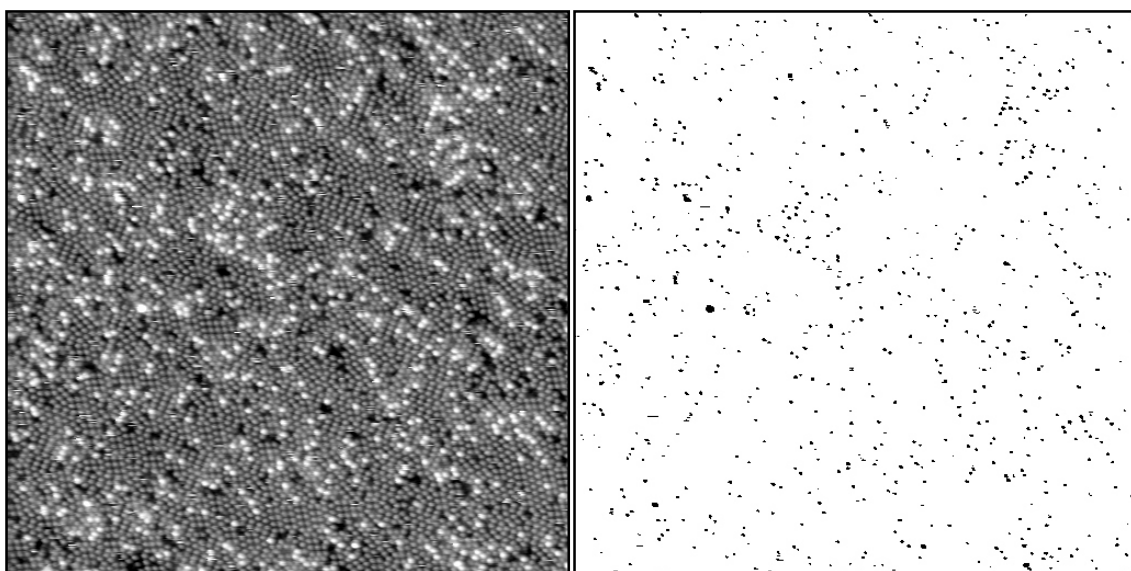


Obrázok 4.8: pokrytie 0.17 ML (30x25 nm, -1V)

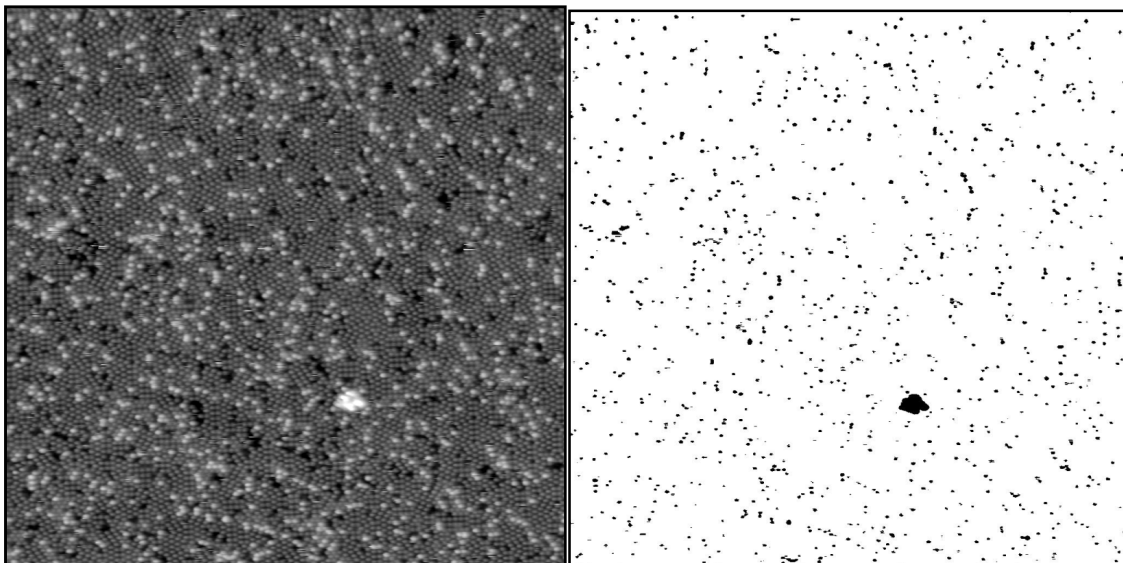
Povrchy na obrázkoch 4.6 - 4.8 boli po schladení na izbovú teplotu zahriate na teplotu  $\approx 330^{\circ}\text{C}$ . Prevažujúcou rekonštrukciou je mozaika  $\text{Tl/Si-}(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ . Priemerné pokrytie:  $(0,19 \pm 0,04) \text{ ML}$ .



Obrázok 4.9: pokrytie 0.030 ML (100x100 nm, -1V)

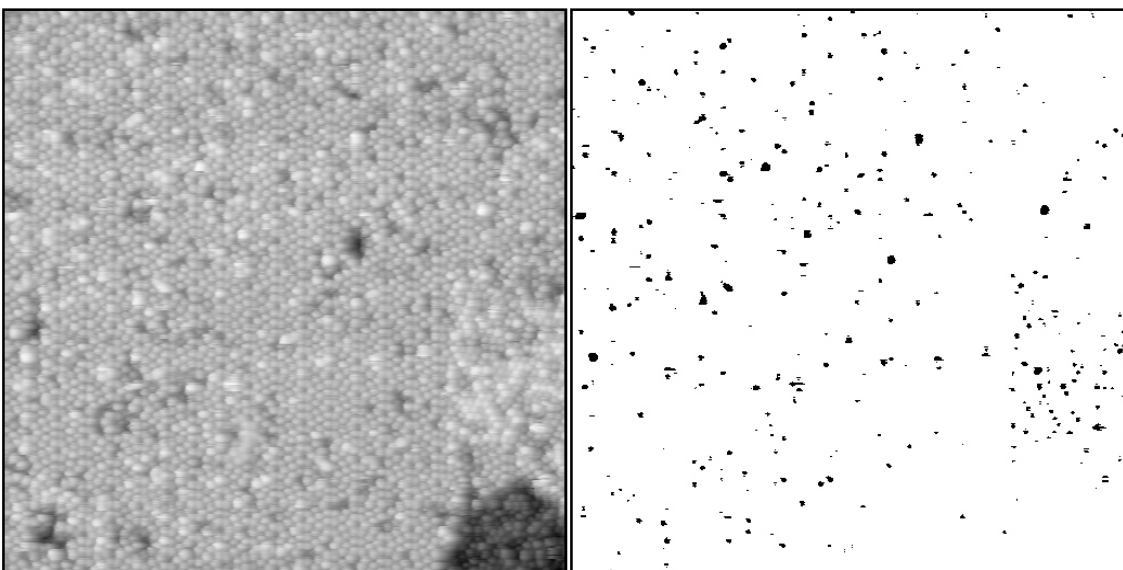


Obrázok 4.10: pokrytie 0.038 ML (50x50 nm, -1V)

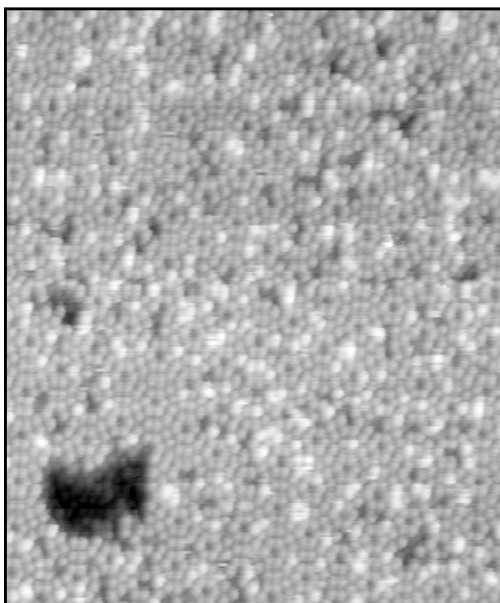


Obrázok 4.11: pokrytie 0.038 ML (60x60 nm, -1V)

Povrchy na obrázkoch 4.9 – 4.11 boli po schladení na izbovú teplotu zahriate na teplotu  $\approx 360^{\circ}\text{C}$ . V tomto štádiu sa nedá povedať, že povrch má nejakú prevládajúcu rekonštrukciu. Vidíme rôzne druhy lokálnych metastabilných usporiadaní  $((2n+1)\times(2n+1), (2\times 2), c(2\times 8), (\sqrt{3}\times\sqrt{3}) \dots)$ . Priemerné pokrytie povrchu bolo určené na  $(0,035 \pm 0,006) \text{ ML}$ .



Obrázok 4.12: pokrytie 0.023 ML (43x43 nm, -0.3V)

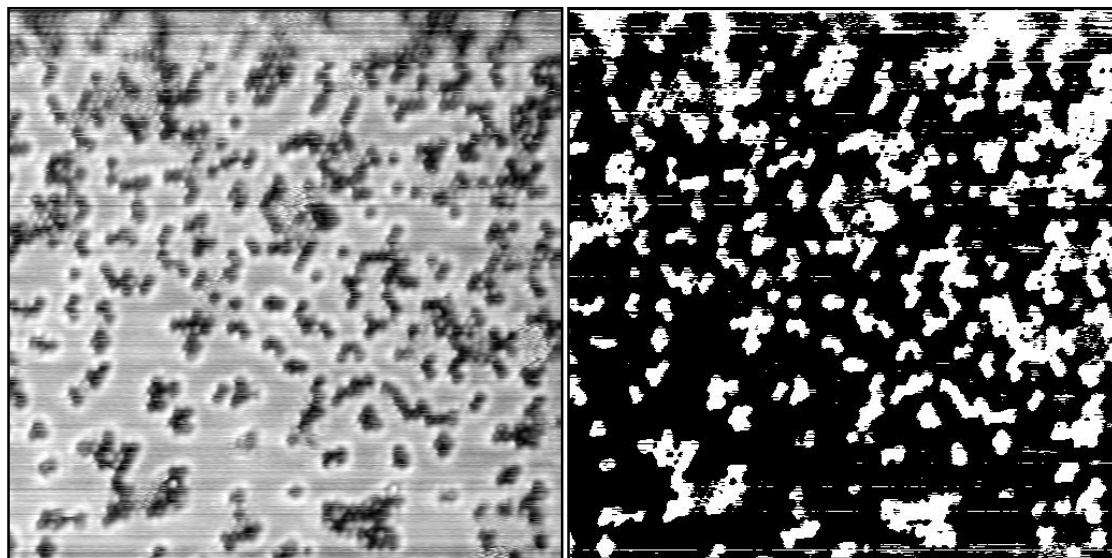


Obrázok 4.13: pokrytie 0.032 ML (určené ručným spočítaním Tl atómov)  
(31x37 nm, -0.3V)

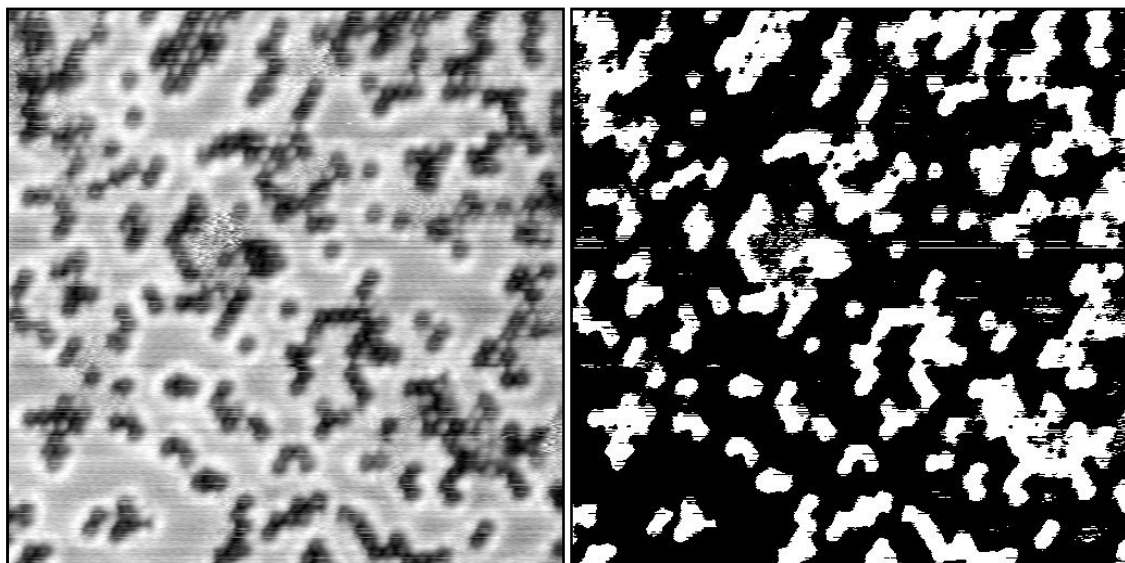
Povrchy na obrázkoch 4.12 - 4.13 boli po schladení na izbovú teplotu zahriate na teplotu  $\approx 360^{\circ}\text{C}$ . Množstvo napareného Tl bolo pri tomto meraní nižšie ako 1ML. To spôsobilo, že oproti meraniu z 4.9 – 4.11 sa (7x7) rekonštrukcia vytvorená pri žíhaní vzorku pôsobením malého množstva Tl celkom neodstránila a pri následnom ohreve sa na povrchu stabilizovala už pri nižšej teplote. Priemerné pokrytie povrchu po zahriatí bolo určené na  $(0,028 \pm 0,007) \text{ ML}$  kvôli spomínanej chybe pri naparovaní Tl sme však tieto výsledky nepoužili pri ďalšom štatistickom spracovaní.

Pre určenie pokrytia sme používali metódu histogramového rozlišovania povrchu (na základe farebného histogramu sme vyčlenili časť povrchu jasnejšiu, resp. tmavšiu ako nami určená hranica). Jednotlivé merania sa však od seba podstatne líšili kvalitou získaných obrázkov a rekonštrukciami na povrchu. Z toho plynulo to, že hranica použitá na histogramové delenie povrchu nebola pevná a závisela na konkrétnom meraní a konkrétnom získanom obrázku (určenie hranice bolo do istej miery subjektívne). Aby sme určili aspoň približnú presnosť použitej metódy, uskutočnili sme jedno kontrolné meranie (obrázky 4.14-4.17). Na povrch vyčistený žíhaním sme naparili 0,7ML tália. Následne sme ho zahriali na teplotu, pri ktorej však ešte nemohlo dôjsť k desorpcii Tl ( $\approx 200^{\circ}\text{C}$ ). Pri obrázkoch ich veľkosť neuvádzame, pretože sme stanovovali len

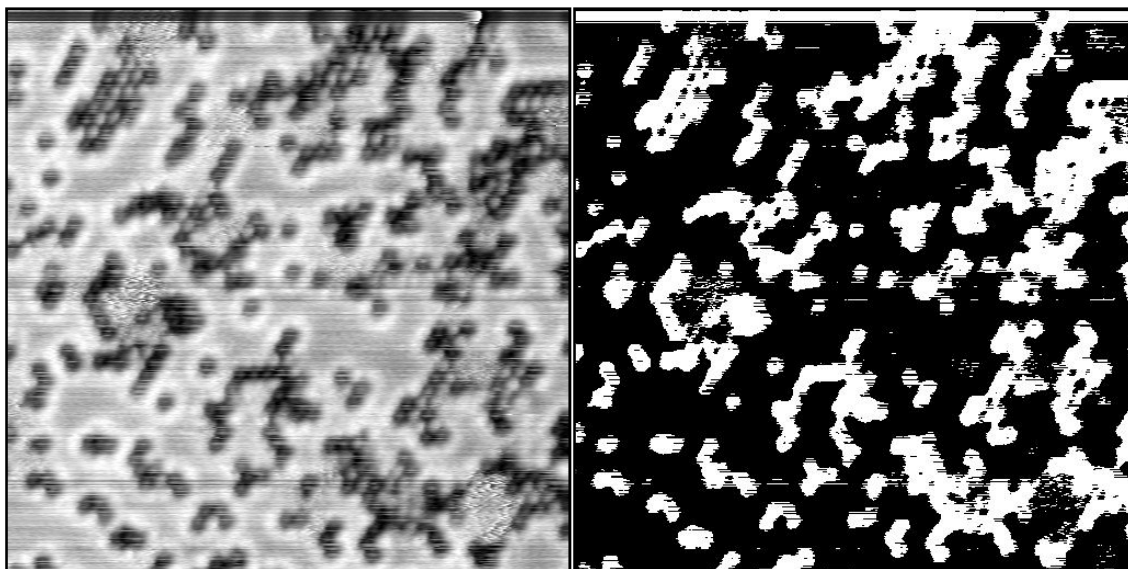
percento pokrytia povrchu, ktoré by v ideálnom prípade nemalo závisieť na veľkosti meranej plochy. Pokrytie, ktoré sme určili našou metódou je  $(0,7 \pm 0,04) ML$ , čo zodpovedá predpokladanému pokrytiu. Nepresnosť metódy sme odhadli na 5-15% v závislosti na kvalite získaných dát a veľkosti skúmanej plochy.



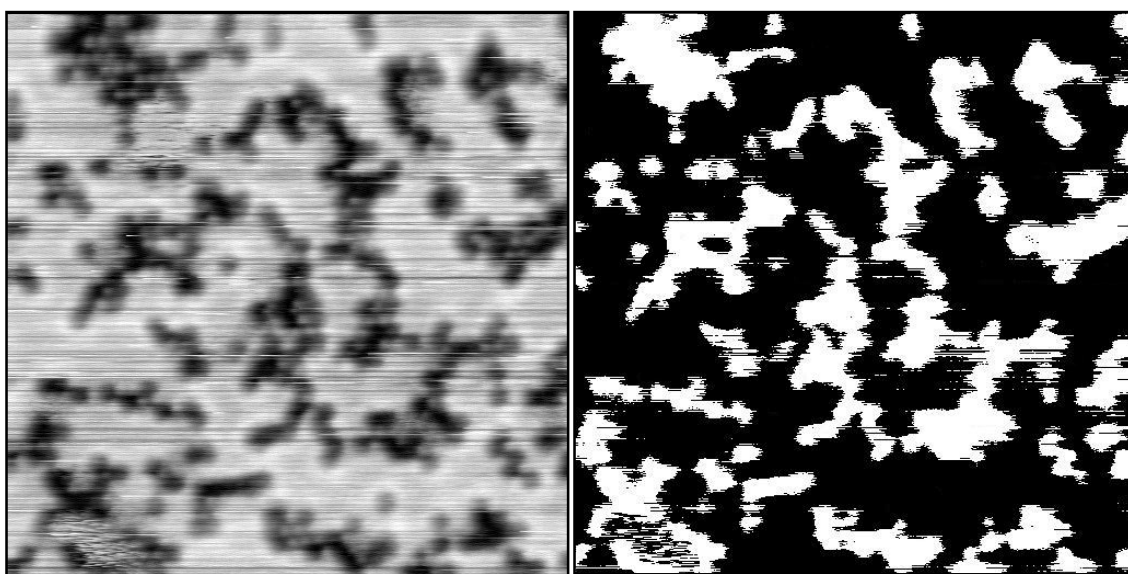
Obrázok 4.14: pokrytie: 0,724 ML (-1V)



Obrázok 4.15: pokrytie: 0,696 ML (-1V)



Obrázok 4.16: pokrytie: 0,693 ML (-1V)



Obrázok 4.17: pokrytie: 0,685 ML (-1.5V)

Priemerné pokrytie na obrázkoch 4.14 – 4.17 je  $(0,70 \pm 0,06) ML$ . Na maskách sú čiernou farbou označené oblasti pokryté Tl.

Na všetkých uvedených obrázkoch bolo odlíšenie Si a Tl atómov robené na základe kontrastu na STM obrázkoch, pričom svetlejšie atómy boli pri všetkých napätiach tie táliové. Táto problematika bola rozoberaná v [19], ale identifikácia táliových atómov sa dá vyvodit' aj z klesajúceho podielu svetlejších povrchových oblastí pri zvyšovaní teploty ohrevu vzorku (postupná desorbcia tália z povrchu).

Určené hodnoty pokrytí povrchu pri jednotlivých teplotách sme po štatistickom spracovaní použili na určenie desorbčnej krivky tália s povrchu Si(111) [16]. Na základe predpokladu, že štrukturálne zmeny pozorované na povrchu boli termálne aktivované a predpokladu, že desorbčná energia  $E_d$  ostáva v rôznych štruktúrach rovnaká, bolo možné na body závislosti pokrytia na teplote nafiťovať závislosť:

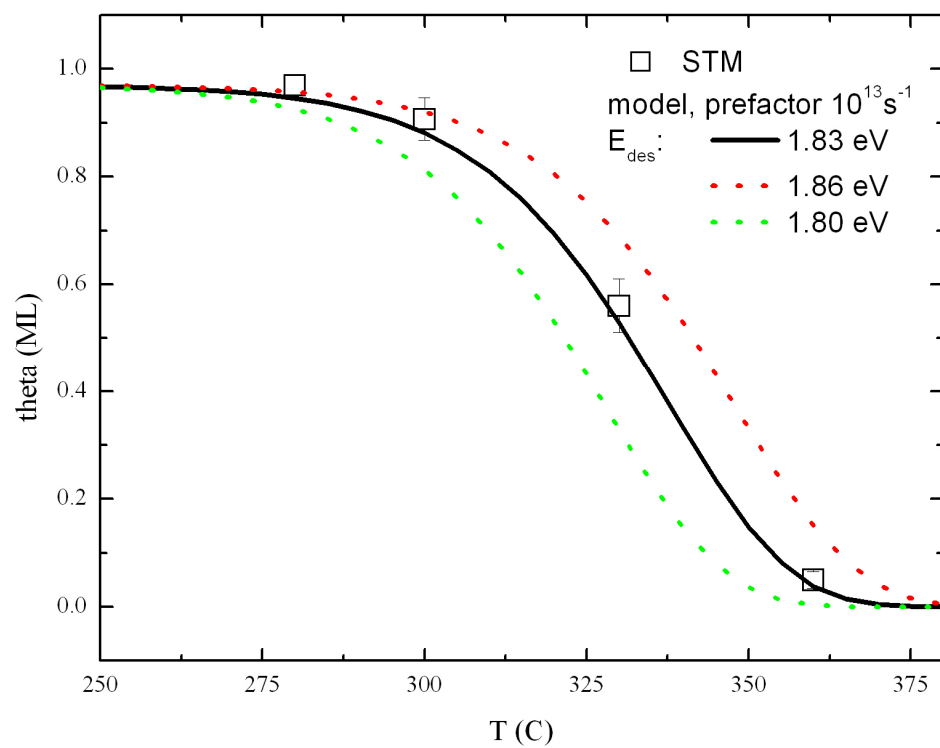
$$\Theta = \Theta_0 \exp(-Rt) \quad (4.1)$$

kde  $\Theta$  je pokrytie povrchu,  $\Theta_0$  je počiatočné pokrytie povrchu,  $t$  je čas a  $R$  je desorbčná rýchlosť, ktorá na teplote závisí prostredníctvom nasledujúceho vzťahu:

$$R = \nu \exp\left(-\frac{E_d}{k_b T}\right) \quad (4.2)$$

kde  $\nu$  je frekvenčný prekaftor,  $k_b$  je Boltzmanova konštanta.

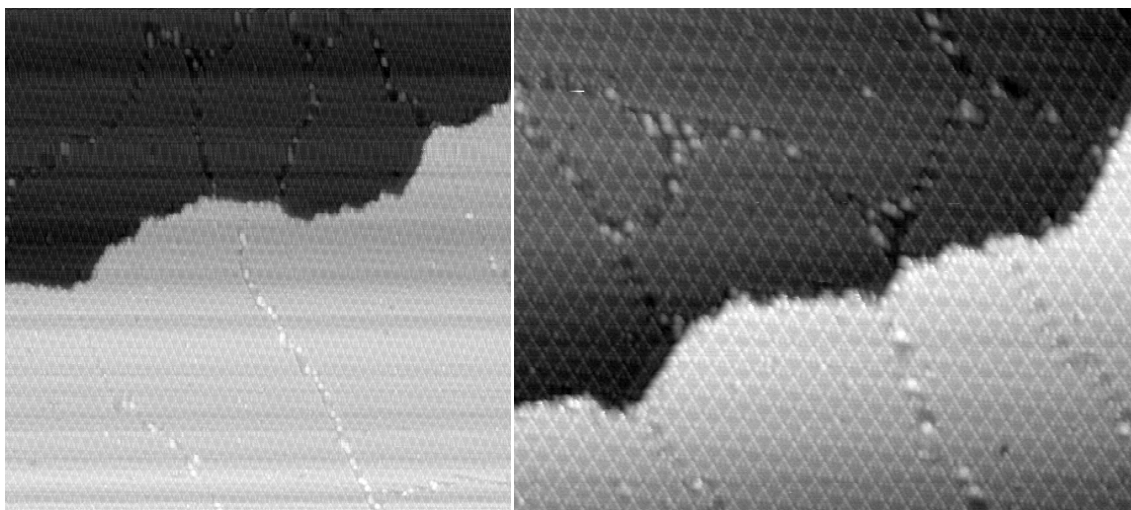
Vzhľadom k tomu, že desorbčná energia potrebná na odpútanie sa jednej častice z povrchu je veľmi závislá na adsorbčnej pozícii a na počte väzieb s povrchovými atómami, dá sa z desorbčnej krivky určiť, či sa v priebehu desorbcie tália z povrchu menil počet väzieb, ktorými boli atómy k povrchu viazané (v prípade, že by sa počet väzieb menil, tak by sa namerané dáta nedali nafiťovať jednoduchou krivkou podľa vzťahu (4.1), ale zložením viacerých). Z nasledujúceho grafu teda vyplýva, že tálium je v celom priebehu desorbcie jednoväzbové (uvedená úvaha je len zjednodušeným priblížením, pri detailnejšom pohľade na vec by sa museli v úvahu brať aj rozdielne typy väzieb a pod.). Okrem toho sa z grafu dá určiť pri akej teplote je na povrchu dostatočne málo tália na to, aby sa dal použiť na ďalšie meranie, čo sme využili v ďalšej časti práce.



Graf 4.1: Určené hodnoty pokrytia povrchu Si(111)-Tl pri rôznych teplotách (dáta sú preložené tromi krivkami podľa vzťahu 4.1 s rôznymi hodnotami  $E_d$ )



### 4.3. Povrch Si(111)-(2n+1)x(2n+1) – magické klastre

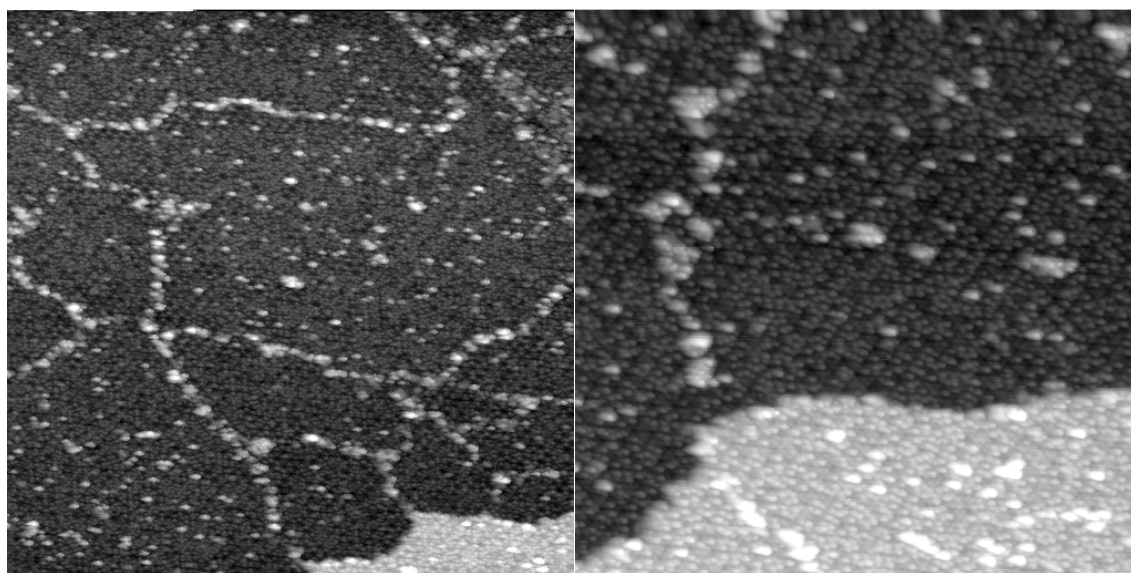


(a)

(b)

Obrázok 4.18: Úplne zrekonštruovaný povrch Si(111)-7x7 s hranicami domén a atomárnym schodom pred naparením Al (a): 100x100nm, 1.5V ; (b): 60x48nm, 1.5V

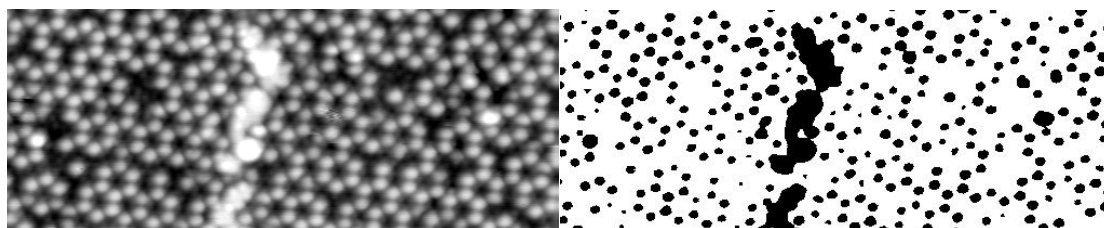
Povrchy na obrázkoch 4.19 až 4.21 boli pripravené naparením Al na predhriaty (290°C) povrch Si(111)-(7x7) (obrázok 4.18).



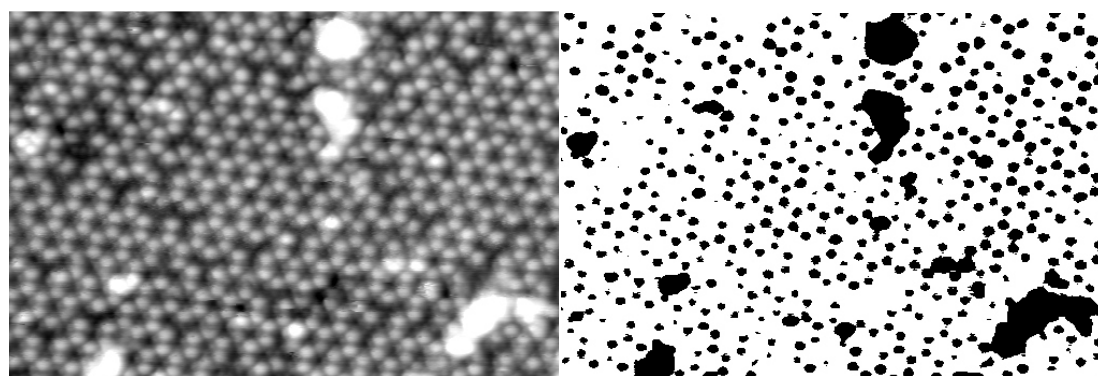
(a)

(b)

Obrázok 4.19: Povrch Si(111)-7x7 s hranicami domén a atomárnym schodom po naparení Al (a): 90x90nm, 1.5V ; (b): 50x50nm, 2.6V

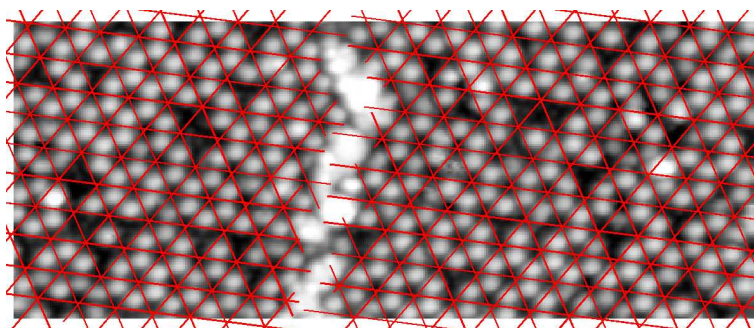


(a)



(b)

Obrázok 4.20: Detailný pohľad na magické klastre Al na Si(111)-(7x7) a masky použité na určenie ich počtu na povrchu (a): 40x16nm -4V ; (b): 40x27nm, -4V



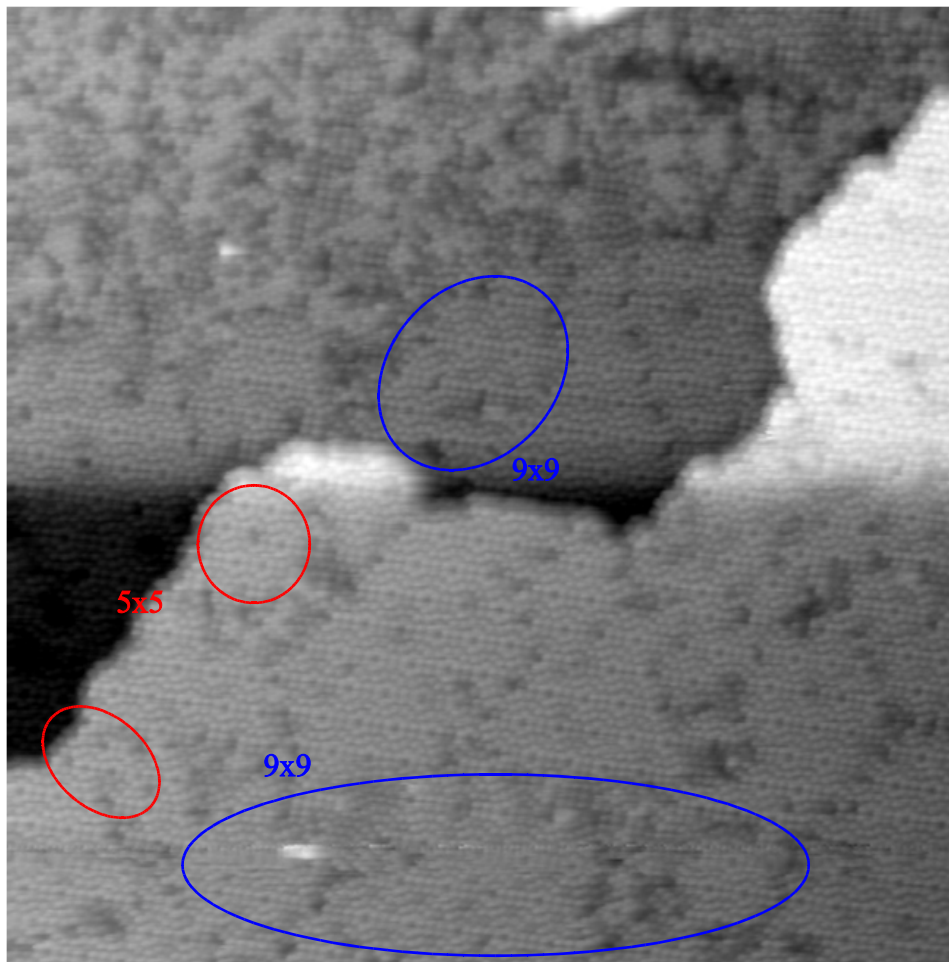
Obrázok 4.21: Hranica medzi dvoma doménami Si(111)-7x7 s magickými klastrami Al (červeno vyznačené sú polohy dimérových línií)

Namerané dáta na rekonštrukcii Si(111)-(7x7) sme okrem zrovnávania s ďalšími meraniami využili aj na orientačnú kalibráciu naparovadla (tú sme používali v ďalšom meraní keď sme chceli napariť presne známe množstvo materiálu). Z detailných obrázkov zachytávajúcich obsadenie jednotlivých HUCs magickými klastrami (obr. 4.20) sme určili ich percento zaplnenia. Zo znalosti toho, že v jednom magickom klastri sa nachádza 6 atómov Al [8,9,10] sme potom spočítali celkový priemerný počet atómov na jednotku plochy. Masky na obr. 4.20 boli použité na vyhodnotenie zaplnenia resp. nezaplnenia danej HUC. Celkový počet HUC na danej oblasti sme určili periodickým doplnením mriežky tak, ako je to naznačené na obr. 4.21. Zaplnenie HUCs nám týmto spôsobom vyšlo:  $(87 \pm 2)\%$ , čo predstavuje približne 0.21ML po prepočte podľa vzťahu (2.2) a uvážení toho, že v jednom magickom klastri sa nachádza 6 hliníkových atómov (pri stopercentnom obsadení HUC magickými klastrami by pokrytie bolo približne 0.24ML).

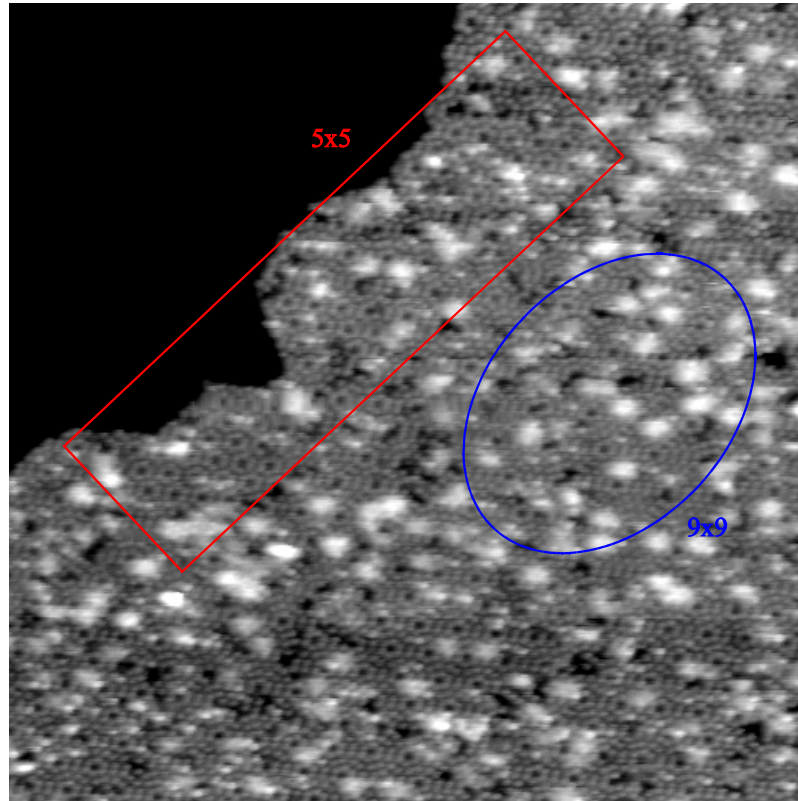
Z obr. 4.21 je evidentné, že sme boli schopní vyhodnotiť len zaplnenie HUCs na jednotlivých doménach. Na hraniciach domén dochádza k posunu v periodickom usporiadaní a lokálnemu rozrušeniu rekonštrukcie. To pravdepodobne vedie k tomu, že v týchto miestach je viac nenasýtených väzieb ako na zvyšku povrchu a teda aj k väčšej miere pokrytia. Nezrekonštruované oblasti sme však neboli našou technikou schopní rozlíšiť a teda pokrytie, ktoré uvádzame je len pokrytie uvažované na jednotlivých doménach (celkové pokrytie je pravdepodobne o niečo vyššie).

#### 4.4. Magické klastre na Si(111)-(5x5) ?

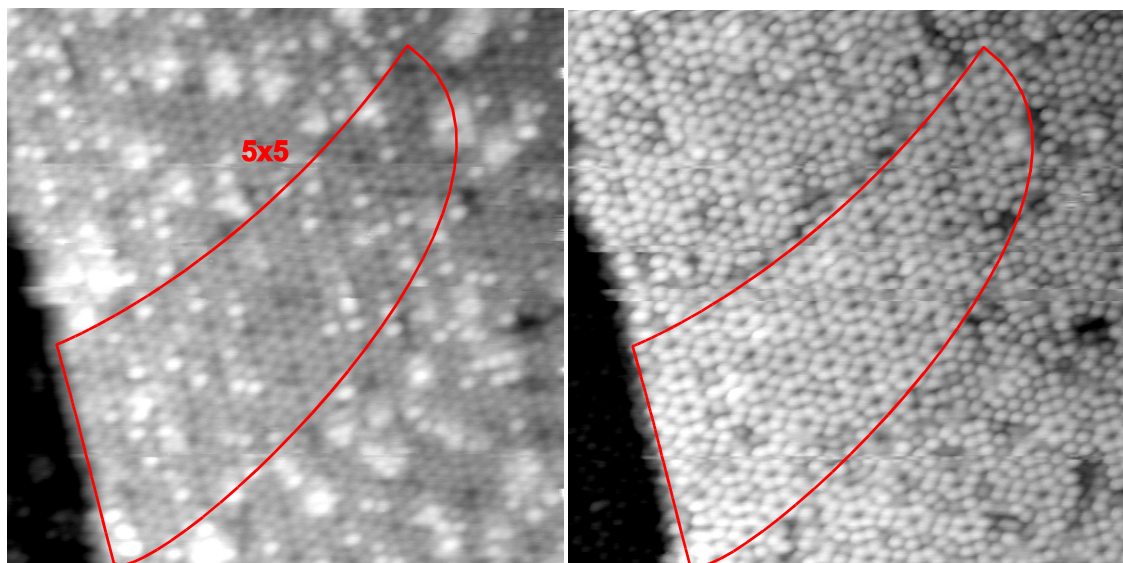
V predchádzajúcej časti sme ukázali, že sme boli schopní vytvoriť takmer dokonale zrekonštruovaný Si(111)-(7x7) s Al magickými klastrami. Ďalším cieľom je preskúmať možnosť vytvorenia podobných magických klastrov na Si(111)-(5x5) (ktorých štruktúru sme navrhli v časti 2.4.5). Pripravili sme si teda povrch metódou desorpcie tália (popísaná v časti 4.1-4.2). Na neho sme napařili najprv malé množstvo hliníka, tak aby sme boli ešte schopní rozoznať rekonštrukcie, na ktoré sa hliník ukladá a aby sme videli, ktoré pozície Al pri desorpcii uprednostňuje (ak také sú). Z kalibrácie Al napařovadla uvedenej v časti 4.3 sme napařené množstvo Al určili na 0.14ML. Hliník bol pritom napařovaný na povrch Si, ktorý bol predhriaty na teplotu 290°C, čo malo zabezpečiť vyššiu pohyblivosť Al atómov a tým ich usadenie v stabilnejších pozíciách.



Obr. 4.22: Povrch so zastúpením metastabilných rekonštrukcií pred depozíciou hliníka (50x50nm, -2V)

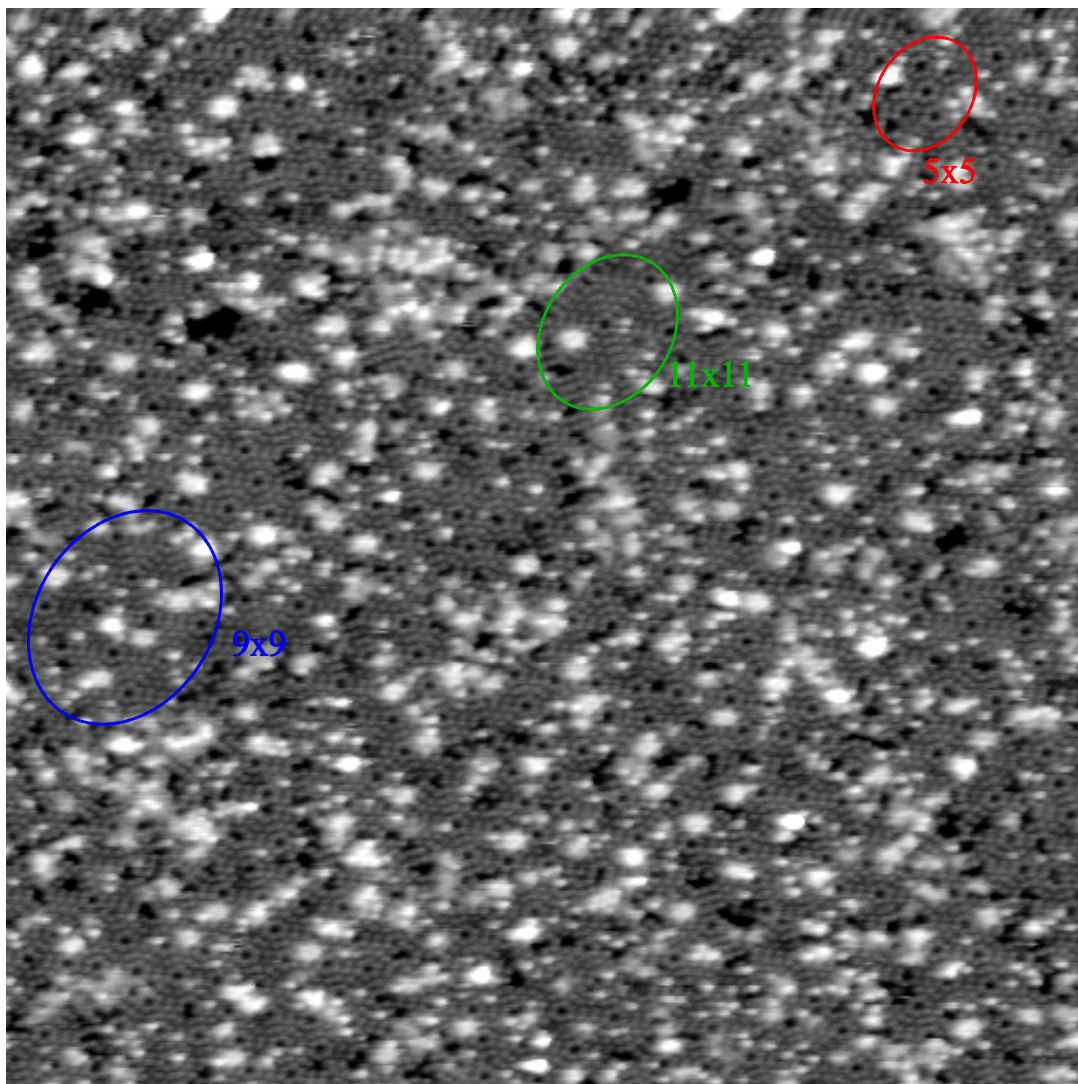


Obr. 4.23: Povrch so zastúpením metastabilných rekonštrukcií po depozícii hliníka  
(40x40nm, -2V)

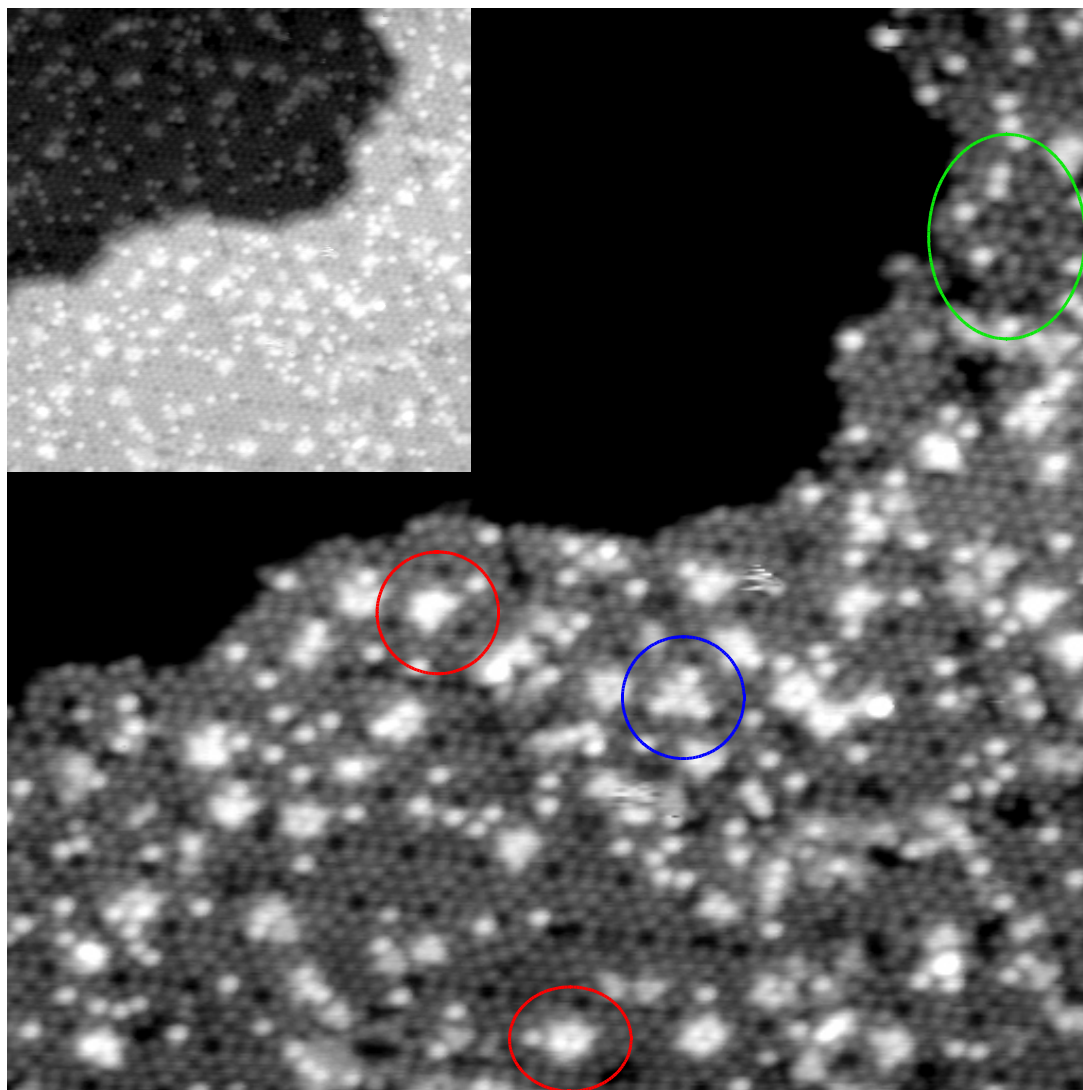


Obr. 4.24: Detail veľkej oblasti s rekonštrukciou (5x5) pri dvoch rozdielnych napätiach  
(20x20nm, vľavo:-1.9V, vpravo:-0.9V) : pri nižších záporných napätiach neboli Al  
štruktúry na povrchu rozlíšiteľné od Si, zvýraznené boli pôvodné rekonštrukcie





Obr. 4.25: Vnútročná časť terasy s metastabilnými rekonštrukciami po depozícii Al (50x50nm, -2V): útvary podobné magickým klastrom sa nachádzajú aj na HUCs s rozmermi väčšími ako (7x7) (v oblasti označenej ako (11x11) môžeme vidieť jeden a v oblasti (9x9) hneď viacero takýchto útvarov (to, že ide o magické klastre s istotou nemôžeme povedať, pretože nemáme obrázky s dostatočným rozlíšením, avšak výzor magických klastrov na (7x7) je pri rovnakom rozlíšení veľmi podobný))



Obr. 4.26: Oblasť v blízkosti atomárneho schodu s atomárnym rozlíšením jednotlivých klastrov (vľavo hore je celkový pohľad, v pravo dole je zvýraznená časť hornej terasy) (30x30nm, -1.9V): červenou sú označené HUCs, na ktorých vznikli magické klastre Al, modrou je označená HUC s magickým klastrom, v ktorej Al substituovali aj rohové Si adatómy [21], zelenou je vyznačená oblasť s pôvodnou rekonštrukciou (5x5) (množstvo napareného Al ešte nebolo dostatočné na to, aby sa na pozorovaných (5x5) HUCs vytvorili klastre (je pozorovaná len substitúcia Si adatómov hliníkovými))

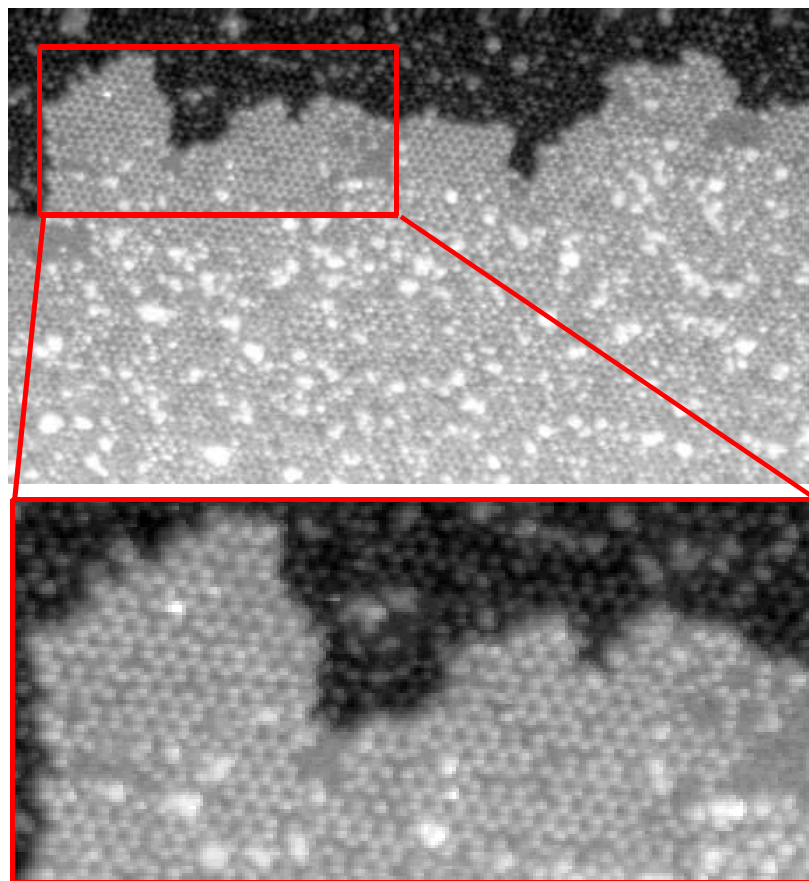
Metastabilné rekonštrukcie, o ktorých bližšie preskúmanie sa snažíme sa pri našom postupe výroby vyskytovali hlavne v blízkosti atomárnych schodov tak, ako to vidíme na obrázkoch 4.22 a 4.23. Vo vnútorných oblastiach terás (obr. 4.25) sa vyskytovali metastabilné rekonštrukcie na menšej časti povrchu (stabilná rekonštrukcia (7x7) pokrývala takmer celý povrch).

Z pozorovania povrchu s metastabilnými rekonštrukciami pri malom množstve napareného Al vyplynulo, že za daných podmienok ešte magické klastre na (5x5) nevznikajú (pozorované boli len ojedinelé magické klastre na (7x7)).

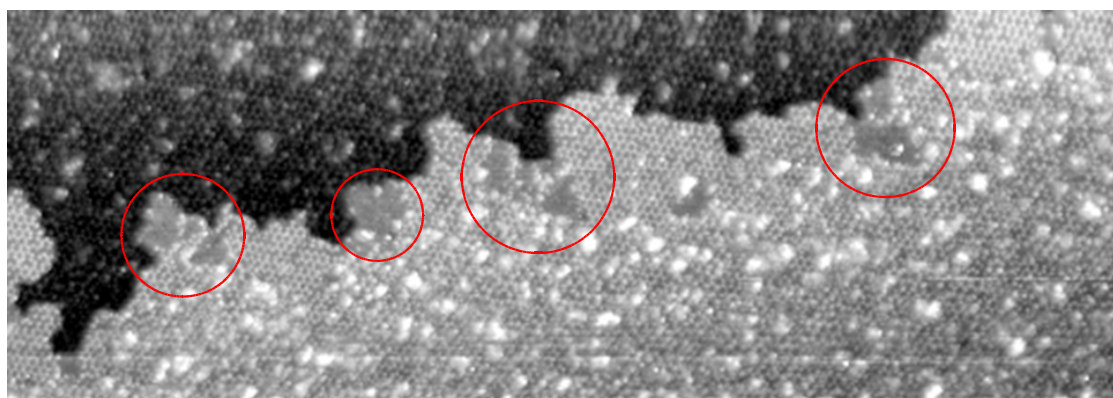
Z toho dôvodu sme pri ďalších meraniach zvyšovali množstvo napareného Al (snažili sme sa dosiahnuť práve stopercentné zaplnenie HUCs magickými klastrami). Na jednej strane to zvýšilo šance na vytvorenie hľadaných klastrov, ale na druhej strane sa tým zväčšili kopovité Al útvary (obr. 4.23-4.26), ktoré podstatne znižovali rozlíšenie tým, že ich atómy ochotne interagovali s hrotom STM. Nadbytočné kopy Al materiálu vznikali pravdepodobne z dôvodu, že množstvo materiálu bolo väčšie ako 0.24ML (stopercentné zaplnenie magickými klastrami). Za vyššie množstvo napareného Al mohla byť zodpovedná kalibrácia Al vyparovača, v ktorej sme do úvahy nebrali nezrekonštruované hranice domén, na ktorých sa mohlo usadiť neznáme množstvo materiálu. Druhým možným vysvetlením vytvárania kôp je to, že rekonštrukcie rôzne od (7x7) prítomné na pripravenom povrchu sa pokrývali rozdielnou povrchovou hustotou Al, a teda na zvyšnej časti povrchu vznikol prebytok hliníka, ktorý sa prejavil tvorbou kopovitých útvarov.

Na častiach pokrytých (7x7) sme však aj napriek tomu boli schopní rozlíšiť, že pod spomínanými neštrukturovanými Al kopami vznikali relatívne dobre usporiadané Al klastre. Na nasledujúcich obrázkoch je vidieť ako daný povrch vyzeral, pričom je zaujímavé zistenie, že v blízkosti atomárnych schodov sa Al kopy znepríjemňujúce meranie takmer nevyskytovali.





Obrázok 4.27: Detail zrekonštruovanej oblasti v blízkosti atomárneho schodu (hore:150x90nm, dolu:67x32nm, -3.5V): periodická štruktúra na obrázku má podľa zrovnania s oblasťami v centrálnej časti terás periodicitu rovnakú ako (7x7))



Obrázok 4.28: Oblasť v blízkosti atomárneho schodu (260x85nm, -4.5V): označené sú oblasti, ktoré sa nám nepodarilo atomárne rozlíšiť a ktorých zastúpenie v okrajových oblastiach terás je približne rovnaké ako zastúpenie rekonštrukcie (5x5) na povrchu pred naparením Al

Ako je vidieť na obrázkoch 4.27 a 4.28, tak ani na detailných záberoch nie je rozlíšená atomárna štruktúra oblastí, ktoré svojou veľkosťou odpovedajú oblastiam (5x5) na čistom povrchu. Ak predpokladáme, že na daných oblastiach pred naparením naozaj (5x5) bola, tak dôvody nerozlíšenia štruktúry môžu byť dva. Prvý je nedostatočné rozlíšenie mikroskopu. Akákoľvek štruktúra vznikajúca na rekonštrukcii (5x5) bola oproti (7x7) hustejšia. Na jej rozlíšenie by sme teda potrebovali vyššiu rozlišovaciu schopnosť, ktorú sme však nedosahovali vďaka spomínaným kopám nadbytočného Al hromadiaceho sa na terasách. Druhým dôvodom nerozlíšenia štruktúry by mohlo byť to, že rekonštrukcia (5x5) bola napareným hliníkom rozrušená do tej miery, že stratila svoju pôvodnú periodicitu.

#### **4.5. Pokračovanie meraní**

V nasledujúcom období by mali experimenty týkajúce sa cieľov práce daných na začiatku, ktoré sa podarilo naplniť len čiastočne, pokračovať. Jedná za hlavne o vylepšenie spôsobu prípravy povrchov so zastúpením rekonštrukcie (5x5). Súčasťou ďalšej práce by mala byť aj príprava kremíkoveho vyparovadla (momentálne nie je súčasťou aparatury), ktoré by umožňovalo uskutočniť homoepitaxný rast kremíkových štruktúr, pri ktorom je známe, že dochádza k tvorbe (5x5) na veľkej časti povrchu [23]. Ešte pri súčasnej metodike prípravy povrchu by sa však mali uskutočniť ďalšie merania snažiace sa o rozlíšenie štruktúry na už pripravených oblastiach (5x5).

V práci sme taktiež objavili skutočnosť, že magickým klastrom podobné objekty vznikajú aj na rekonštrukciách s HUCs väčšími ako (7x7) (obrázok 4.25), preto bude náš záujem ďalej orientovaný aj týmto smerom, keďže tieto väčšie HUCs vznikajú súčasne na povrchoch s (5x5) a to väčšinou v ich tesnej blízkosti.

## 5. Záver:

V práci nám podarilo preskúmať niektoré z javov vyskytujúcich sa pri heteroepitaxii kovov tretej skupiny (predovšetkým hliníka a tália) na povrch Si(111) a jeho rôzne rekonštrukcie.

V teoretickej časti sme stručne popísali všeobecné poznatky dnes známe v oblasti rastu tenkých vrstiev. Bližšie sme popísali možné povrchové rekonštrukcie povrchu Si(111) a zaujímavé štruktúry, ktoré na takomto povrchu je možné následne vytvoriť (magické klastre na Si(7x7) a možné magické klastre Si(5x5)). Opísali sme princíp našej meracej aparatury a meracie podmienky, ktoré boli počas experimentu v aparátúre udržiavané.

Na základe pozorovaní desorpcie Tl z povrchu Si(111) sme určili teplotu, pri ktorej na povrchu vznikajú metastabilné rekonštrukcie a zároveň je povrch dostatočne vyčistený od zbytkového Tl (450-500°C). Túto teplotu sme následne použili na prípravu povrchu s metastabilnými rekonštrukciami, na ktoré sme naparovali rôzne množstvá hliníka. Pozorovali sme magické klastre hliníka na čistom povrchu Si(111)-(7x7). Pozorovaním oblastí v blízkosti atomárnych schodov sme štatisticky identifikovali, ktoré časti povrchu boli pred naparením Al pokryté rekonštrukciou (5x5). Štruktúru magických klastrov na rekonštrukcii (5x5) sa nám však nepodarilo rozoznať.

Hlavnými výsledkami práce teda sú: určenie závislosti pokrytia povrchu Si(111) na teplote, z toho odvodená metóda prípravy povrchu s metastabilnými rekonštrukciami a určenie väzbovosti táliových atómov v povrchových rekonštrukciách na Si(111), navrhnutie teoretických štruktúrnych modelov pre magické klastre na rekonštrukcii (5x5) a pozorovanie oblastí povrchu príslušných k tejto rekonštrukcii po naparení hliníka, pozorovanie štruktúry magických klastrov na rekonštrukcii (7x7) a podobných objektov na rekonštrukciách (9x9) a (11x11).

## 6. Reference:

- [1] IMAI, Yoji, et al. Formation energies of two-dimensional nuclei randomly-generated on (001), (110), and (111) planes of a face-centered-cubic crystal. *Thin Solid Films*. 1997, 300, s. 305-313.
- [2] SCHULZE, G.; HENZLER, M. Adsorption of atomic hydrogen on clean cleaved silicon (111). *Surface Science*. 1983, 124, s. 336-350.
- [3] HOSHINO, T. Adsorption of atomic and molecular oxygen and desorption of silicon monoxide on Si(111) surfaces. *Physical review B*. 1999, 59, s. 3.
- [4] VISIKOVSKIY, Anton V. . *Structural investigation of thallium adsorption on Si(100) and Si(111) surfaces*. Kyushu, 2006. 132 s. Diplomová práce. Kyushu University.
- [5] KOCÁN, Pavel. *Study of Heteroepitaxial Growth on Reconstructed Si Surfaces* . Praha, 2004. 112 s. Univerzita Karlova v Praze.
- [6] KOCÁN, Pavel. *Studium heteroepitaxe Ag na Si*. Praha, 2001. 51 s. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [7] KOIKE, M., et al. Scanning tunneling microscopy study of the c(2x8) ordering in “1x1” phase on the quenched Si(111) surface. *Physical review B*. 1997, 23.
- [8] JIA, Jin-Feng, et al. Fabrication and structural analysis of Al, Ga, and In nanocluster crystals. *Physical review B*, . 2002, 66, s. 165412.
- [9] LI, Jian-Long . Spontaneous Assembly of Perfectly Ordered Identical-Size Nanocluster Arrays. *Physical review letters*. 2002, 88, s. 6.

- [10] OHTAKE, Akihiro. Atomic structure of the Ga nanoclusters on Si(111)-(7x7). *Physical review B*. 2006, 73, s. 033301.
- [11] BECKER, R.S. , et al. Real-space observation of surface states on Si(111)-(7x7) with tunneling microscope. *Physical review letters*. 1985, 55, s. 9.
- [12] BINNING, G., et al. 7x7 reconstruction on Si(111) resolved in real space. *Physical review letters*. 1983, 50, s. 2.
- [13] [Http://geocities.yahoo.co.jp/](http://geocities.yahoo.co.jp/) [online]. 1996 [cit. 2011-03-21]. Makoto Itoh's home page. Dostupné z WWW: <<http://www.geocities.jp/mitoh6/index.html>>. (prebraný obrázok vychádza z výsledkov prác [11,12])
- [14] [Http://venables.asu.edu/](http://venables.asu.edu/) [online]. 1996 [cit. 2011-03-21]. Lecture notes on Surfaces and Thin Films. Dostupné z www: <<http://venables.asu.edu/grad/lectures.html>>.
- [15] [Http://gwyddion.net/](http://gwyddion.net/) [online]. 2004 [cit. 2011-03-21]. Gwyddion. Dostupné z WWW: <<http://gwyddion.net/>>.
- [16] KOCÁN P., SOBOTÍK P., MATVIJA P., OŠŤÁDAL I., Thermal desorption of thallium from Si(111) surface, Univerzita Karlova v Praze, to be publised
- [17] [Http://hoffman.physics.harvard.edu/](http://hoffman.physics.harvard.edu/) [online]. 2010, 2010 [cit. 2011-03-21]. STM: more technical details. Dostupné z WWW: <<http://hoffman.physics.harvard.edu/research/STMtechnical.php>>. (prebraný vzťah vychádza z výsledkov práce [18])
- [18] BINNIG, G., et al. Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Physical review letters*. 1982, 49, s. 57-61.

- [19] KOTLYAR, V. G., et al. Thallium overlayers on Si(111) studied by scanning tunneling microscopy. *Surface Science*. 2003, 543, s. 663–667.
- [20] FEENSTRA, R.M.; LUTZ, M.A. Formation of the (5x5) reconstruction on cleaved Si(111) surfaces studied by scanning tunneling microscopy. *Physical review B*. 1990, 42, s. 5391–5394.
- [21] YOON, M.; WILLIS, R.F. Substitution of In for Si adatoms and In-induced charge redistribution of the Si(1 1 1)-(7x7) surface. *Surface Science*. 2002, 512, s. 255-261.
- [22] JIA, Jinfeng, et al. Artificial nanocluster crystal: Lattice of identical Al clusters. *Applied physics letters*. 2002, 80, s. 17.
- [23] VEUILLEN, J.Y, et al. Growth of Si on disordered Si(111) (1x1) surfaces. *Surface Science*. 1998, 402, s.295-298.

## 7. Použité skratky:

STM :	scanning tunneling microscope (skenovací tunelový mikroskop)
HUC/HUCs :	half unit cell/half unit cells (půlcela/půlcely)
FHUC:	faulted half unit cell
UHUC:	unfaulted half unit cell
ML :	monolayer (monovrstva); v prípade Si(111)-1x1 : $1ML = 7,83 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
UHV :	ultra high vacuum (ultra vysoké vákuum)